

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

**Серія: Проблеми удосконалення електричних машин
і апаратів. Теорія і практика**

№ 61 (967) 2012

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 р.

Харків
НТУ "ХПІ", 2012

Вісник Національного технічного університету "ХПІ".

Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 61 (967). – 187 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською і російською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" включено до "Переліку наукових Фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України № 6, 2010 р. стор. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л.Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І. Сокол, чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; Є.С. Александров, д-р техн. наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.; А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В.В. Спіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.; В.І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; М.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.

Заступник відповідального редактора: В.Ф. Боллюх, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: І.С. Варшамова, асистент.

Члени редколегії: В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; В.І. Мілих, д-р техн. наук, проф.; Сучков Г.М. д.т.н., проф.; Є.І. Сокол, д-р техн. наук, проф.

З номеру 42'2012 Вісник НТУ "ХПІ" має власну подвійну нумерацію № 42 (948)

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ";

Протокол № 9 від 23.11.2012.

В.Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПІ"
Є.В. ГОНЧАРОВ, м.н.с., НТУ "ХПІ"

ВИКОРИСТАННЯ ЯВИЩА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ У СТРУМООБМЕЖУЮЧОМУ РЕАКТОРІ

У статті проаналізована конструкція струмообмежуючого реактора з надпровідними екраном і обмоткою. Теоретично розглянуто роботу такого надпровідного обмежувача струму короткого замикання в основних режимах. Проведений аналіз критеріїв вибору основних параметрів такого пристрою.

Ключові слова: обмежувач струму короткого замикання, надпровідність, основні параметри.

В статье проанализирована конструкция токоограничивающего реактора со сверхпроводящим экраном и обмоткой. Теоретически рассмотрена работа такого сверхпроводящего ограничителя тока короткого замыкания в основных режимах. Проведен анализ критериев выбора основных параметров такого устройства.

Ключевые слова: ограничитель тока короткого замыкания, сверхпроводимость, основные параметры.

In the paper the design of a current-limiting reactor with a superconducting shield and a winding is analyzed. Work of such superconducting fault current limiter in the basic modes is theoretically considered. The criteria of a choice of basic parameters of such a device are analyzed.

Index terms: fault current limiter, superconducting, basic parameters.

Вступ. Виникнення аварійних струмів короткого замикання в електромережах спричиняє руйнацію електрообладнання, і захист від цього негативного явища є досить важливою задачею. Для обмеження струмів і підтримання напруги на шинах при аварійному режимі використовуються багато різновидів реакторів – електричних апаратів, що виконані у вигляді котушки з незмінною індуктивністю. По виду магнітної системи розрізняють реактори без осердя, з феромагнітним осердям, підмагнічуванні постійним струмом, із замкнутою системою магнітопроводу та ін.; за конструктивними особливостями обмотки відомі реактори з кабельною обмоткою, дисковою, обмоткою зі стрічкового провідникового матеріалу, з радіальним або аксіальним напрямком намотування.

По виду ізоляції також розрізняють сухі й маслонаповнені реактори.

Основні споживачі струмообмежувальних реакторів – електричні станції, розподільні підстанції, електричні мережі, великі промислові підприємства, енергоємні об'єкти інфраструктури. У своїй більшості реактори використовуються у розподільних мережах напругою 6-10 кВ. Основним недоліком традиційних реакторів є значні втрати потужності у номінальному режимі роботи.

Метою роботи є аналіз роботи надпровідного обмежувача струму короткого замикання і вибор його основних параметрів.

Одним з новітніх напрямів в електроенергетиці є використання явища високотемпературної надпровідності при азотному рівні температур (~ 77 К). Розробка таких обмежувачів струму короткого замикання базується на використанні фізичних властивостей високотемпературних надпровідників. Надпровідний обмежувач струму короткого замикання послідовно вмикається в частину електромережі, яка передбачає захист від аварійних струмів. Такий реактор має близький до нуля опір в номінальному режимі на відміну від традиційних струмообмежувальних реакторів.

За конструктивними особливостями можна виділити дві основні схеми надпровідного обмежувача: резистивну і індуктивну. На них ґрунтується більшість інших пропонованих конструкцій, які повинні задовольняти тим же вимогам [1]. В той же час об'єднання цих схем в єдину конструкцію дає можливість скористатися перевагами кожної з них.

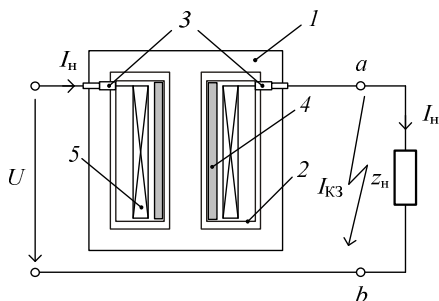


Рис. – Схематичне зображення НП обмежувача струму КЗ з екраном.

На рис. подана конструктивна схема такого надпровідного реактора. В загальному кріостаті 2, що охоплює центральний стержень осердя 1 розташовані надпровідні екрани 4 і обмотка 5.

При нормальному режимі роботи по основній обмотці 5 обмежувача протікає номінальний струм I_n , надпровідний (НП) екран 4 знаходиться у надпровідному докритично-

му стані і не пропускає магнітний потік в осердя 1. Обмотка 5 виготовлена з НП проводу, який не має активного опору. Таким чином обмотка 5 має незначну індуктивність.

Індуктивність обмотки за надпровідного стану екрана [2]:

$$L_{\text{нп}} = \frac{\Psi}{I_{\text{ном}}} = \mu_0 w^2 \frac{2\pi r_{\text{ср}} b_{\text{обм}}}{3h_{\text{обм}}}, \quad (1)$$

де μ_0 – магнітна стала; w – кількість витків обмотки; $r_{\text{ср}}$ – середній радіус надпровідної обмотки; $b_{\text{обм}}$ – ширина обмотки; $h_{\text{обм}}$ – висота обмотки.

Падіння напруги на обмежувачі струму у номінальному режимі [3]

$$U_{\text{м ос}} = k_{\text{ос}} \cdot U_{\text{м н}} = 2 \pi f w \Phi_{\text{м ос}}, \quad (2)$$

де f – частота змінного струму; w – число витків обмотки; $\Phi_{\text{м ос}}$ – амплітуда магнітного потоку, зчепленого з обмоткою у номінальному режимі; $k_{\text{ос}}$ – коефіцієнт, що визначає падіння напруги на обмежувачі струму по відношенню до напруги електричної мережі.

Критичне значення індукції магнітного потоку $B_{\text{кр}}$ на зовнішній поверхні стінки ВТНП екрана:

$$B_{\text{кр}} = \mu_0 \cdot H_{\text{кр}} \quad (3)$$

Наступним чином $B_{\text{кр}}$ пов'язане з параметрами НП обмотки і номінальним струмом:

$$H_{\text{кр}} = \frac{B_{\text{кр}}}{\mu_0} = \frac{w k_{\text{ле}} I_{\text{ном}}}{h_{\text{обм}}}, \quad (4)$$

де $k_{\text{ле}}$ – коефіцієнт перевищення номінального струму, за якого втрачається надпровідність екрана; w – кількість витків обмотки; $h_{\text{обм}}$ – висота обмотки.

При виникненні КЗ зростає напруженість магнітного поля на поверхні НП екрана 4 від основної НП обмотки 5. Як тільки магнітне поле перевищить критичне значення $B_{\text{кр}}$ для НП екрана 4, він втратить надпровідність та діамagnetизм. Магнітний потік перейде в середній стержень магнітопроводу 1, відповідно зростає індуктивність основної обмотки 5 та її індуктивний опір, що і обмежує струм КЗ.

При втраті надпровідного стану ВТНП екраном магнітні потоки розсіяння можна не враховувати і прийняти індуктивність [2]:

$$L_{\text{кр}} = \frac{B_{\text{ст}} \pi r_{\text{ст}}^2 w}{k_{\text{зл}} \cdot I_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

де $k_{\text{зл}}$ – коефіцієнт перевищення номінального струму; $B_{\text{ст}}$ – індукція насичення сталі магнітопроводу; $r_{\text{ст}}$ – радіус центрального стержня осердя.

У режимі короткого замикання обмежувач повинен узяти на себе номінальну напругу електромережі

$$U_{\text{м н}} = 2 \pi f w B_{\text{кз}} \pi r_{\text{ст}}^2, \quad (6)$$

де $B_{\text{кз}} = k_B B_{\text{н ст}}$ – індукція в осердді ($H = w I_{\text{кр}} / l_{\text{ос}}$); $B_{\text{н ст}}$ – індукція насичення сталі осердя магнітопроводу; k_B – коефіцієнт запасу індукції за

кривою намагнічування матеріалу; I_{oc} – середня довжина магнітної силової лінії в осерді.

Висновки. У номінальному режимі індуктивність надпровідного реактора незначна, отже падіння напруги на реакторі, відповідно, буде близько декількох відсотків від номінальної напруги, що задовольняє вимогам. Відсутність активного опору надпровідної обмотки забезпечить енергозбереження у номінальному режимі.

При виборі параметрів надпровідного обмежувача струму короткого замикання визначальними є величини критичної індукції надпровідного екрана та індукції насичення осердя.

Розробка надпровідних пристроїв, зокрема надпровідних реакторів є перспективним напрямком електроенергетики.

Список літератури: 1. Тенденції розвитку і використання високотемпературних надпровідникових струмообмежувачів / Данько В.Г., Гончаров Є.В., Лисенко Л.І. та ін. // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 38. – С. 35-44. 2. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Аналіз роботи високотемпературного надпровідникового обмежувача струму короткого замикання // Східно-європейський журнал передових технологій. Енергозберігаючі технології і обладнання. – Харків: Технологічний центр. – Харків: Технологічний центр, 2007. – № 6/5 (30). – С. 45-48. 3. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Теоретичні засади і вибір основних параметрів електромагнітного надпровідного обмежувача струму / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 48. – С. 30-36.

Надійшла до редколегії 27.11.2012



Данько Володимир Григорович – доктор технічних наук, професор. Завідувач кафедри загальної електротехніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси пов'язані з проблемами у галузі нагрівання і охолодження традиційних електричних машин та розроблення надпровідних машин.



Гончаров Євген Вікторович, захистив диплом інженера в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за фахом електричні машини й апарати в 2004 р. Молодший науковий співробітник кафедри загальної електротехніки НТУ "ХПІ".

Наукові інтереси пов'язані з проблемами використання високотемпературної надпровідності в електричних пристроях.

А.Г. СЕРЕДА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

Н.Г. ФОНТА, ст. преп., НТУ "ХПИ"

В.В. МОРГУН, студент, НТУ "ХПИ"

С.А. БЕРЕЗАНСКИЙ, студент, НТУ "ХПИ"

ПОВЫШЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК СОБСТВЕННЫХ НУЖД НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4 КВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В статье показана необходимость и приведено научно-техническое обоснование предложений по модернизации систем релейно-токовой защиты электроустановок напряжением 0,4 кВ за счет применения цифровых технологий с целью реализации требований "дальнего резервирования".

Ключевые слова: дальнейшее резервирование, быстродействующая селективная защита, микропроцессорное устройство защиты.

У статті показана необхідність і наведено науково-технічне обґрунтування пропозицій щодо модернізації систем релейно-струмового захисту електроустановок напругою 0,4 кВ за рахунок вживання цифрових технологій з метою реалізації вимог "віддаленого резервування".

Ключові слова: віддалене резервування, швидкодіючий селективний захист, мікропроцесорний пристрій захисту.

In the paper a necessity is shown and the scientific and technical ground of suggestions on the relay-current protection systems modernization of electric device by voltage 0.4 kV due to digital technologies application with the purpose of the "remote backup" requirements realization is proved.

Keywords: remote backuping, fast acting selective protection, microprocessor protection device.

Введение. Как для электрооборудования атомных электростанций (АЭС) в целом, так и для их электроустановок собственных нужд (СН), актуальной проблемой является *повышение надежности* релейно-токовой защиты с целью *повышения пожарной безопасности*. Для снижения вероятности возникновения пожара в электроустановках СН-0,4 кВ были приняты более жесткие требования к системам их защит [1]. Элементы электроустановки (кабели и шины) должны быть защищены при отказе автоматического выключателя, к отводящим зажимам которого они подключены. Для реализации этого требования, получившего название "дальнего резервирования" необходимо, чтобы чувствительность к токам короткого замыкания (КЗ) вышестоящих

© А.Г. Серед, Н.Г. Фонта, В.В. Моргу, С.А. Березанский, 2012

выключателей была достаточно высокой. Это означает, что в существовавшей и существующей системе "ступенчато-временной" селективной защиты все элементы электроустановки должны быть термически устойчивы при большем, чем рассчитывалось при проектировании, времени срабатывания защиты, а именно при времени срабатывания вышестоящего селективного выключателя. Время же срабатывания вышестоящего аппарата, как правило, в два и более раз больше, чем у отказавшего нижестоящего. То есть вследствие ограниченных возможностей повышения чувствительности к токам удаленных КЗ существующей аппаратуры снижение времени срабатывания защиты при реализации режима "дальнего резервирования" не выполнено. Время-токовая характеристика всей системы селективной защиты не изменилась. Остаются элементы электроустановки, которые в аварийном режиме испытывают критическую тепловую нагрузку. Таким образом, существующая система защиты не обеспечивает в полном объеме надёжной защиты электроустановок СН-04 кВ за счет реализации "дальнего резервирования". В этой связи считается актуальным дальнейшее совершенствование системы релейно-токовой защиты в части повышения чувствительности к токам удаленного КЗ.

Анализ существующих проблем в системе релейно-токовой защиты электроустановок СН-0,4 кВ АЭС, не позволяющих реализовать режим "дальнего резервирования", а также новых технических решений, основанных на использовании цифровых технологий при определении параметров электрической цепи и направленных на реализацию "дальнего резервирования" за счет построения быстродействующей селективной защиты и повышения чувствительности к токам удаленного КЗ, является **целью настоящей статьи**.

Анализ проблем в реализации "дальнего резервирования".

Наиболее проблематичные токопроводы в части надёжного обеспечения "дальнего резервирования" релейно-токовой защиты целесообразно проиллюстрировать на схеме электроустановки. На рис. 1 приведен фрагмент электрических цепей СН-0,4 кВ одного блока АЭС. Имеется несколько разветвлённых участков с разным количеством ступеней защиты между источником и приемником электроэнергии. Наибольшее число ступеней защиты приходится на цепи в шкафах релейно-токовой защиты оборудования (РТЗО), где на I ступени возле источника тока, установлен выключатель "Электрон", на II ступени – выключатели АЗ790С, на III ступени – выключатели ВА55А31, на последней IV ступени – выключатели АК-50Б. В такой многоступенчатой системе защиты каждый из вышестоящих выключателей должен обес-

печить как селективное срабатывание с нижестоящим аппаратом, так и резервирование возможного отказа нижестоящего выключателя.

Указанные требования, во многом, противоречивы. Проанализируем, в какой мере повышена надежность защиты за счет реализации режима "дальнего резервирования", и какие проблемы, обусловленные несовершенством защитных характеристик существующих аппаратов, все еще требуют решения.

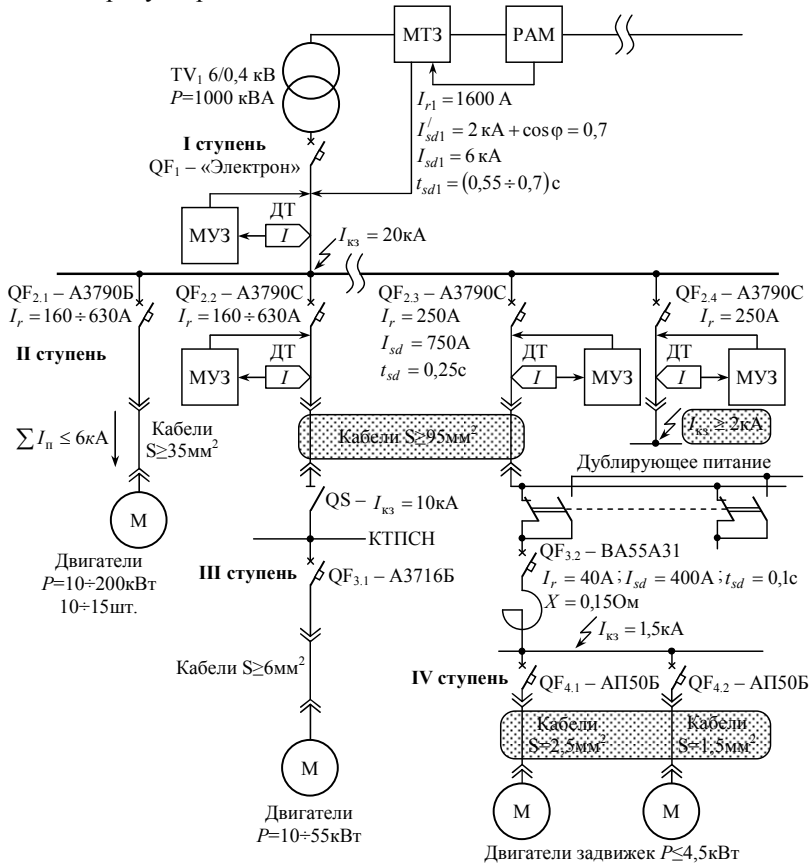


Рис. 1 – Фрагмент схемы электроустановки собственных нужд СН-0,4 кВ АЭС.

Повысить чувствительность к токам удаленного КЗ необходимо для выключателей I и III ступеней защиты ("Электрон" и ВА55А31, соответственно). В противном случае заштрихованные участки токоп-

ровода (рис. 1) за выключателями АЗ790С и АП50Б при их отказах окажутся незащищенными. Способы повышения чувствительности, использованные для выключателей I и III ступеней, оказались различными, но адекватными возможностям имеющейся защитной аппаратуры. Для повышения чувствительности выключателя I ступени "Электрон" в качестве критерия идентификации тока КЗ в отличие от близкого по величине пускового тока электродвигателя (ЭД) использовано значение коэффициента мощности $\cos\varphi$ цепи. При КЗ на протяженной кабельной линии значение $\cos\varphi$ составляет 0,6-0,7 [2], тогда, как при разгоне ЭД $\cos\varphi = 0,2-0,3$ [2, 3]. Так как в расцепителях существующих выключателей, в том числе и в аппарате "Электрон" нет функции определения величины $\cos\varphi$ защищаемой цепи, чувствительность I ступени защиты повышена с помощью релейной аппаратуры на высоковольтной стороне. В её состав входит максимальная токовая защита (МТЗ) с двумя токовыми уставками (рис. 1). Срабатывание от меньшей по величине уставки происходит только от тока, обусловленного активной мощностью.

Несовершенство такого технического решения состоит в том, что высоковольтную аппаратуру можно использовать только на I ступени защиты, контролируя при этом ток на высокой стороне трансформатора. Для повышения чувствительности к токам КЗ выключателей III ступени защиты применить такую релейную аппаратуру невозможно. Если бы такое техническое решение было применено в аналогичном устройстве на напряжение 0,4 кВ, то проявился бы другой недостаток – недостаточное быстродействие защиты. Действительно, точное определение величины $\cos\varphi$ по углу сдвига между током и напряжением в фазе, возможно только после окончания переходного процесса, спустя 60-80 мс. Однако такое время срабатывания защиты недопустимо при реализации быстродействующей селективной защиты.

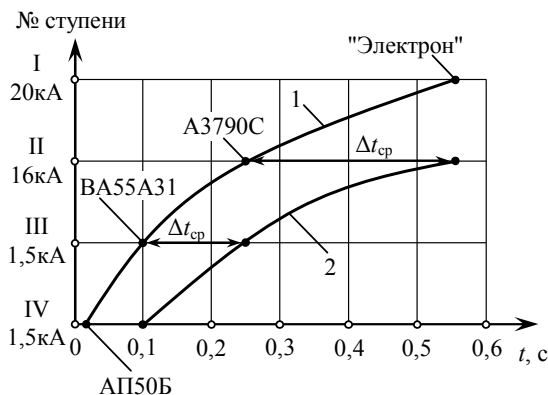
По причине невозможности повышения чувствительности за счет идентификации вида тока возмущения цепи по величине $\cos\varphi$ для выключателя III ступеней защиты было использовано альтернативное решение. Для защиты кабелей 1,5 и 2,5 мм² в случае отказа выключателей АП-50Б (рис. 1), в выключателях ВА55А31 повышена чувствительность токовой защиты в зоне перегрузки. Теперь защитная времятоковая характеристика зоны перегрузки формируется в соответствии с выражением $5I^2 \times 4с = \text{const}$ вместо используемого ранее $6I^2 \times 4с = \text{const}$, и термическая устойчивость кабелей за выключателями АП-50Б при протекании по ним аварийного тока обеспечивается. Однако при "дуге" КЗ (более 90% всех КЗ), в режиме "дальнего резервирования"

существенно увеличивается время горения дуги. Поэтому такое техническое решение нужно признать вынужденным из-за отсутствия соответствующей аппаратуры, в которой чувствительность защиты в зоне КЗ реализуется за счет идентификации вида тока возмущения цепи.

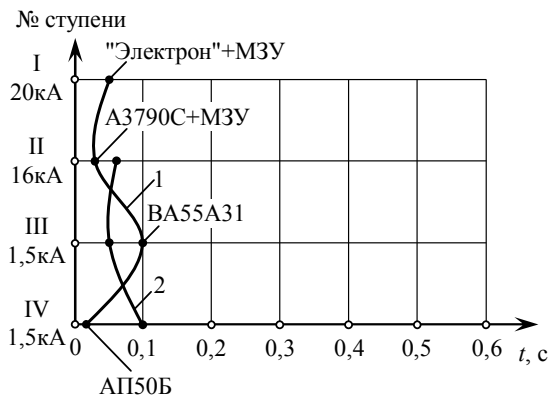
Второй проблемой, мешающей использовать преимущества "дальнего резервирования" в полном объеме, является недостаточное быстроедействие "ступенчато-временной" селективности, в результате чего формируется некорректная с технической точки зрения времятоковая характеристика всей системы защиты. Некорректность состоит в том, что чем ближе к источнику тока расположена ступень защиты, а значит, чем больше ток КЗ, тем больше и время срабатывания аппаратов на этой ступени (рис. 2, а). Кривая 1 (рис. 2, а) отражает времятоковую характеристику "ступенчато-временной" селективной защиты, состоящей из 4 ступеней, для случая, когда все аппараты защиты работают в штатном режиме (без отказов). Действительно, на IV ступени защиты, где ток КЗ не более 1,5 кА время срабатывания защиты составляет 15 мс, а на I ступени, где аварийный ток равен 20 кА время срабатывания защиты значительно больше – 550-700 мс. При столь больших временах срабатывания защиты элементы электроустановки, особенно на первых ступенях защиты, испытывают значительные термические и динамические нагрузки. Но еще большие термические нагрузки испытывают шины и кабели при работе защиты в режиме "дальнего резервирования", когда в случае отказа нижестоящего аппарата защиту осуществляет вышестоящий выключатель. Кривая 2 отражает времятоковую характеристику защиты в режиме "дальнего резервирования" (рис. 2,а). В этом режиме элементы электроустановки, прежде всего кабели сечением $S \geq 95 \text{ мм}^2$, защищаемые выключателями II ступени (рис. 1) испытывают увеличение термической нагрузки от протекающего через них тока более чем в 2 раза. Время срабатывания защиты t на II ступени увеличивается с 0,25 до 0,55 с, увеличение на $\Delta t_{\text{ср}} = 0,3 \text{ с}$, на III ступени с 0,1 до 0,25 с, увеличение на $\Delta t_{\text{ср}} = 0,15 \text{ с}$.

Значительное увеличение времени срабатывания защиты на II ступени в случае отказа выключателя АЗ790С в шкафах КТПСН и РТЗО создает проблему термической устойчивости кабелей в кабельных отсеках за указанными выключателями. Частичное решение возможно за счет увеличения сечения кабелей и применения усиленных средств пожаротушения в "проблемных" шкафах. Однако следует учитывать, что 90-95 % случаев коротких замыканий являются не "глухими" металлическими, а через короткую электрическую дугу. В этом случае при большом времени срабатывания защиты проблемы

термической устойчивости кабелей и пожарной безопасности шкафа полностью не устраняются, и указанные решения нельзя признать исчерпывающими и технически корректными. Такие вынужденные решения применены из-за отсутствия аппаратуры, в которой возможно реализовать быстродействующую селективную защиту.



а



б

Рис. 2 – Времятоковая характеристика селективной защиты:
а – до модернизации "ступенчато-временная" селективность;
б – после модернизации быстродействующая интегральная селективность;
1 – штатный режим; 2 – режим "дальнего резервирования".

Результаты проведенного анализа проблем с реализацией режима "дальнего резервирования" показали, что для повышения надежности

системы РТЗО необходимо повысить чувствительность к токам удаленного КЗ. Используемый в настоящее время способ повышения чувствительности является вынужденным, как в части технической реализации, так и по инструментальному исполнению. Низкая чувствительность и недостаточное быстродействие являются причиной нестабильности защиты от удаленных КЗ на магистральном токопроводе, а также IV ступени, вследствие значительных времен срабатывания аппаратов защиты кабелей 1,5 и 2,5 мм² в режиме резервирования. При использовании "ступенчато-временной" селективной защиты времена срабатывания защиты в режиме резервирования получаются недопустимо большими. Поэтому кабели за выключателями АЗ790С в режиме резервирования испытывают критические термические нагрузки.

Модернизация системы защиты электроустановок СН АЭС.

С учетом анализа существующих проблем в части использования режима "дальнего резервирования" для повышения надежности защиты и пожарной безопасности электроустановок СН-0,4 кВ АЭС разработаны новые технические решения, суть которых заключается в возможности надёжно, независимо от момента возникновения тока возмущения электрической цепи, и быстро, в первые 10 мс, определить:

- вид тока возмущения: пусковой ток электродвигателя, ток удаленного КЗ, или ток кратковременной перегрузки;
- действующее (установившееся) значение тока возмущения.

Быстрая идентификация тока возмущения и определение его действующего значения позволяет правильно построить требуемый алгоритм срабатывания защиты:

- мгновенное отключение, если действующее значение фазного тока I_ϕ больше величины токовой уставки "отсечки" I_i : $I_\phi > I_i$;
- селективное с нижестоящим аппаратом отключение при возникновении тока КЗ если величина тока I_ϕ больше чувствительной уставки I'_{sd} : $I_\phi > I'_{sd}$;
- автоматическое увеличение токовой уставки до величины I_{sd} , достаточной для надёжного пуска и разгона электродвигателя.

Указанные технические решения, реализуемые в микропроцессорном устройстве, позволяют значительно усовершенствовать защитную времятоковую характеристику каждого аппарата и всей системы защиты в целом. Микропроцессорные устройства с новыми защитами могут быть реализованы как в виде электронных расцепителей выключателей, так и в виде отдельных блоков. Использование отдельных блоков целесообразно при модернизации уже существующих электроустановок, так как в этом случае полностью сохраняется вся структура

электроустановок, в результате чего существенно снижаются финансовые затраты на модернизацию.

На рис. 1 показаны микропроцессорные устройства защиты (МУЗ), которые устанавливаются отдельными блоками возле выключателей АЗ790С и "Электрон". Выходные цепи МУЗ воздействуют на независимые электромагнитные расцепители (РН) указанных выключателей. Таким образом, принцип добавления недостающих видов защит, принятый для выключателей "Электрон", предлагается применить и для выключателей АЗ790С.

На рис. 3 приведена защитная времятоковая характеристика автоматического выключателя, работающего совместно с МУЗ, полученная в результате модернизации.

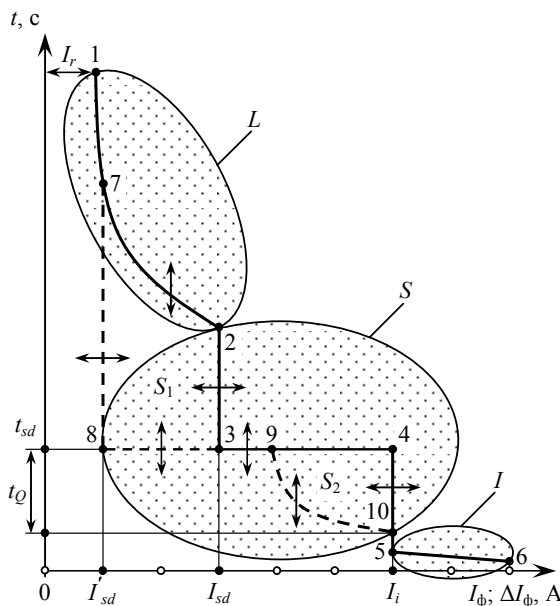


Рис. 3 – Времятоковая защитная характеристика выключателя, работающего совместно с МУЗ после модернизации: L – защита зоны перегрузки; S – защита зоны КЗ; S_1 – защита от удаленного КЗ или резервирование; S_2 – быстродействующая интегральная селективная защита; I – защита "отсечки".

Сплошными линиями показаны защитные характеристики, формируемые защитами самого аппарата. Пунктирными линиями показаны

ны защитные характеристики, иллюстрирующие работу МУЗ. Помимо токовой уставки I_{sd} , выбираемой по условиям пуска-разгона электродвигателя, вводится дополнительная уставка I'_{sd} , меньшая по величине, обеспечивающая высокую чувствительность к токам удаленных КЗ. До модернизации переход от зоны перегрузки к зоне КЗ происходил всегда по траектории 2-3. Для новой защиты указанный переход, в зависимости от причины возмущения цепи, может происходить как по линии 2-3 (уставка I_{sd}), так и по ломаной линии 2-7-8 (уставка I'_{sd}). Срабатывание защиты может происходить в момент времени, определяемый как обычной временной задержкой t_{sd} , так и "интегральной" уставкой Q_{sd} , благодаря которой время срабатывания при больших токах КЗ существенно снижается. Это позволяет сделать защиту быстродействующей и высокочувствительной к токам удаленных КЗ.

По оси абсцисс защитная характеристика имеет два параметра: полный фазный ток I_{ϕ} , на величину которого реагирует расцепитель выключателя в зоне перегрузки, и его приращение, ток возмущения цепи ΔI_{ϕ} , на величину которого реагирует МУЗ в зоне КЗ. Таким образом, повышается надежность идентификации небольших по величине токов КЗ, так как определение значения $\cos\phi$ производится только для конкретного тока возмущения цепи ΔI_{ϕ} : пуск ЭД или КЗ, а не для суммарного тока I_{ϕ} , в котором могут быть как пусковые реактивные токи, так и небольшие активные токи КЗ и кратковременной перегрузки.

Участок 1-2 защиты от токов перегрузки (рис. 3) формируется в существующих расцепителях автоматических выключателей. Здесь время срабатывания t обратно зависит от величины полного тока I_{ϕ} в фазе. "Отстройка" МУЗ от токов перегрузки осуществляется за счет того, что фазные токи I_{ϕ} представляют собой сумму токов совокупности нескольких подключенных к линии потребителей. Поскольку значение тока нагрузки каждого из подключенных потребителей не может быть больше, чем значение рабочего тока I_r защищаемой линии, ток возмущения ΔI_{ϕ} электрической цепи, обусловленный подключением одного потребителя, также не может быть больше I_r . Вероятность одновременного подключения к линии нескольких потребителей в промежутки времени равный 20 мс очень мала, а непрерывный мониторинг тока ΔI_{ϕ} предусматривает "обнуление" тока предыстории через каждый период изменения тока (каждые 20 мс). В результате такой "отстройки" разработанная токовая защита МУЗ не реагирует на ток перегрузки при увеличении последнего от точки 1 до точки 2 в зоне L времятоковой характеристики (рис. 3).

Переход от зоны перегрузки L к зоне КЗ S в зависимости от типа тока возмущения ΔI_{ϕ} осуществляется либо по траектории 2-3, если

величина ΔI_{Φ} больше величины токовой уставки I_{sd} , выбранной с учетом обеспечения гарантированного пуска-разгона электродвигателя, либо по траектории 2-7-8 в случае удаленного КЗ или в режиме "дальнего резервирования". Если ток возмущения ΔI_{Φ} идентифицирован как пусковой ток электродвигателя, то токовая уставка защиты увеличивается от значения I'_{sd} до величины I_{sd} .

Отрезок времятоковой характеристики (рис. 3) между током I'_{sd} , определяющим уставку удаленного КЗ или резервирование, и током I_i , определяющим уставку "отсечки", формируется временным и интегральными модулями МУЗ. Оба модуля параллельно формируют время срабатывания селективной защиты по двум разным зависимостям. Время срабатывания, формируемое временным модулем, не зависит от значения тока электрической цепи ($t = t_{sd} = \text{const}$), а время срабатывания t_Q , формируемое интегральным модулем, находится в обратной зависимости от величины интеграла квадрата (действующего значения) фазного тока. Благодаря параллельному формированию времени обеспечивается быстродействующая интегральная селективность. Если возник небольшой по величине ток КЗ ($\cos \varphi = 0,6-0,7$), то срабатывание МУЗ происходит даже при токах возмущения $\Delta I_{\Phi} = I'_{sd}$, близких по величине рабочему току I_r аппарата (участок 1-7, рис. 3). Время срабатывания в этом случае определяется значением фиксированной выдержки времени $t = t_{sd} = \text{const}$ (траектория 8-4, либо 9-4, рис. 3). При значительных аварийных токах время срабатывания t уменьшается (траектория 9-10, рис. 3) вследствие того, что интегральная уставка Q_{sd} , обеспечивающая селективность, учитывает возможный отказ нижестоящего выключателя, тем самым, ограничивая ток КЗ. В результате интеграл отключения электрической цепи вышестоящим выключателем оказывается значительно меньшим интеграла отключения этой же цепи нижестоящим выключателем с фиксированной выдержкой времени на отключение. При наличии в МУЗ интегральной уставки Q_{sd} , величина которой выбирается в два раза большей, чем интеграл отключения электрической цепи нижестоящего аппарата, время срабатывания селективной защиты, определяемое величиной Q_{sd} , получается значительно меньшим преднамеренной задержки срабатывания t_{sd} . В результате сохраняется селективное срабатывание нижестоящего и вышестоящего аппаратов, но время селективного срабатывания получается значительно меньше, чем при "ступенчато-временной" селективной защите.

Например, при "ступенчато-временной" селективности временная уставка $t_{sd(B)}$ вышестоящего выключателя АЗ790С шкафа РТЗО должна

быть 0,2 с при временной уставке $t_{sd(n)}$ нижестоящего выключателя ВА55А31 равной 0,1 с. Время же селективного срабатывания МУЗ вышестоящего выключателя АЗ790С по интегральной уставке Q_{sd} будет значительно меньше. Интеграл отключения нижестоящего выключателя ВА55А31 с предельным для места его установки током КЗ равным 1,5 кА составит: $Q_{sd(n)} = 1,5^2 \text{ кА} \cdot 0,1 \text{ с} = 2,25 \cdot 10^5 \text{ А}^2\text{с}$. Тогда при величине интегральной уставки вышестоящего выключателя $Q_{sd(n)} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ А}^2\text{с}$ время срабатывания МУЗ при токе КЗ в месте установки выключателя АЗ790С равном 16 кА, составит около 6 мс. А значит время отключения выключателя АЗ790С по команде от МУЗ, с учетом собственного времени срабатывания механизма выключателя и длительности процесса дугогашения не превысит 20 мс, то есть на порядок меньше, чем величина "ступенчато-временной" селективной уставки $t_{sd} = 200$ мс самого выключателя.

В случае превышения током возмущения ΔI_{ϕ} значения уставки "отсечки" I_i защита срабатывает без преднамеренной задержки срабатывания (траектория 10-5-6, рис. 3).

Специально отметим, что техническая суть быстродействующей интегральной селективной защиты не ограничивается введением дополнительной интегральной уставки Q_{sd} . Благодаря Q_{sd} появляется возможность снизить время срабатывания защиты и при больших токах КЗ. Для этого необходимо максимально быстро и, в то же время, максимально точно определить установившееся значение тока возмущения цепи ΔI_{ϕ} . Уставка I_{sd} задается действующим значением тока, которое может быть определено только после окончания переходного процесса изменения тока возмущения, спустя 40-60 мс. Чтобы избежать ложных срабатываний интегральной селективной защиты расчет интеграла протекающего через аппарат тока следует начинать только после установления факта, что ток возмущения цепи ΔI_{ϕ} действительно больше тока уставки I_{sd} . Однако если для определения действующего значения тока необходимо 40-60 мс, то такая защита может считаться интегральной, но никак не быстродействующей. В предлагаемой интегральной селективной защите благодаря возможностям микропроцессорной техники действующее значение тока определяется в первые 10 мс после возникновения тока возмущения цепи ΔI_{ϕ} . При этом высокая точность определения действующего значения установившегося тока задолго до окончания переходного процесса обеспечивается благодаря техническому решению, позволяющему "отстроиться" от такого случайного параметра, влияющего на точность измерения тока ΔI_{ϕ} , как фаза возникновения тока возмущения [4]. В случае же

небольших по величине токов удалённых КЗ необходима надёжная идентификация вида тока возмущения: удаленное КЗ, пуск электродвигателя, или кратковременная перегрузка. Надёжность идентификации удаленного КЗ зависит от надёжности определения $\cos\varphi$ именно для цепи с током возмущения ΔI_ϕ . В предлагаемом техническом решении надёжность определения $\cos\varphi$, надёжность идентификации сверхтока, а значит и надёжность защиты в целом в режиме "дальнего резервирования", обеспечивается за счет быстрого анализа именно тока возмущения цепи ΔI_ϕ , а не "средневзвешенного" фазного тока I_ϕ . Если в цепи, где стоит вводной аппарат "Электрон" (рис. 1), одновременно протекает пусковой ток двигателя, подключенного в начале цепи и защищаемого выключателем АЗ790Б, и ток дугового КЗ в конце линии за выключателем АЗ790С, то точно определить значение $\cos\varphi$ цепи по суммарному току I_ϕ , затруднительно. При непрерывном же мониторинге именно тока возмущения ΔI_ϕ , трудностей анализа величины $\cos\varphi$ не существует. Поэтому повышение чувствительности защиты, основанное на быстром анализе не полного тока в фазе I_ϕ , а только тока возмущения ΔI_ϕ , существенно повышает надёжность идентификации тока КЗ, и тем самым позволяет использовать режим "дальнего резервирования" в полном объеме.

Рассмотренные преимущества (высокая чувствительность к токам КЗ и быстрое действие) защитной времятоковой характеристики за счет использования комбинации автоматический выключатель + МУЗ позволяют успешно решить обозначенные целью статьи проблемы защиты электроустановок СН-0,4 кВ при их модернизации. На рис. 1 приведена схема электрических цепей СН-0,4 кВ, где после модернизации к выключателям II ступени защиты добавлены блоки МУЗ. Как видно, структура электрических цепей после модернизации мало изменилась, так как конструктивно модернизация в виде подключения дополнительных МУЗ коснулась лишь выключателей АЗ790С шкафов КТПСН и РТЗО, а также вводного аппарата "Электрон". Доля этих выключателей в общем количестве аппаратов защиты составляет не более 5 %. При этом в самих аппаратах изменений нет: присутствуют все существующие на сегодня защиты, а также сохранены токовые и временные уставки. Это минимизирует финансовые и временные затраты на модернизацию системы защит. В то же время, несмотря на столь малое вмешательство в структуру электрических цепей, сама система защиты цепей СН-0,4 кВ АЭС качественно улучшается. В результате модернизации решается проблема повышения надёжности защиты за счет реализации режима "дальнего резервирования".

На рис. 2,б приведены времятоковые защитные характеристики системы защит электрических цепей СН-0,4 кВ после модернизации как в штатном режиме без отказов (кривая 1), так и в режиме "дальнего резервирования" (кривая 2). Как видно из приведенных зависимостей времени срабатывания защиты t от номера ступени защиты $N_{\text{ст}}$: $t = f(N_{\text{ст}})$, времена срабатывания защиты в режиме "дальнего резервирования" (нештатный режим работы аппаратов защиты) незначительно отличаются от времен срабатывания в штатном режиме. Это означает, что наряду с повышением чувствительности защиты к токам удаленного КЗ, обеспечивается и второе необходимое условие реализации преимуществ "дальнего резервирования" – сохранение высокого быстродействия срабатывания аппаратов защиты. Времена срабатывания интегральной быстродействующей селективной защиты при больших токах КЗ на I и II ступенях защиты получаются существенно меньше, чем до модернизации, при использовании "ступенчато-временной" селективности (рис. 2,а). Таким образом, за счет повышения быстродействия защиты решается проблема чрезмерной термической нагрузки на кабели в кабельных отсеках за выключателями АЗ790С шкафов КТПСН и РТЗО. Время срабатывания защиты в режиме резервирования (кривая 2, рис. 2,б) при отказе выключателя АЗ790С составляет 50-60 мс. Это на порядок меньше, чем время срабатывания этих же аппаратов при "ступенчато-временной" селективной защите в режиме "дальнего резервирования", а также в пять раз меньше, чем при "ступенчато-временной" селективной защите в штатном режиме работы. Благодаря существенному увеличению быстродействия защиты существенно снижаются термические удары и на другие элементы электроустановки. Столь же существенно снижается разрушительное воздействие (деформация от возникающего давления) энергии дуги при "дуговом" КЗ на стенки шкафов.

Все рассмотренные выше способы повышения быстродействия и чувствительности защиты за счет добавления к существующим выключателям "Электрон" и АЗ790С дополнительного МУЗ предусматривают, что в МУЗ имеются лишь новые виды защит, которых нет в существующих аппаратах, а именно высокочувствительная защита к токам удаленного КЗ и быстродействующая интегральная селективная защита. Именно такой подход обеспечивает минимальные временные и финансовые затраты на модернизацию системы защиты существующих электроустановок СН-0,4 кВ АЭС, так как полностью сохраняется вся структура системы защиты, и нет необходимости заменять существующие выключатели на новые. Возможен и другой формат

модернизации системы защиты, обусловленный необходимостью продления срока службы всей существующей системы защиты. Технология альтернативной модернизации предусматривает ревизию существующего состояния отдельных узлов и элементов аппаратов защиты. По результатам такой ревизии принимается решение о необходимости замены данного аппарата на новый, либо об отсутствии необходимости такой замены. При таком подходе к модернизации системы защиты возникают непреодолимые трудности в ревизии полупроводниковых расцепителей выключателей АЗ790С, так как технология изготовления последних предусматривает заливку всей элементной базы этих расцепителей эпоксидной смолой. Из-за этого нет никакой возможности провести визуальный и другой анализ состояния электронной базы расцепителей. Поэтому для продления срока службы системы защиты необходимо произвести замену всех выключателей АЗ790С. Использование же МУЗ для модернизации системы защиты позволяет избежать замены выключателей. Для этого в перечень защит МУЗ необходимо дополнительно ввести те виды защит, которые сейчас существуют в выключателях АЗ790С. Это значит, что оправдавший себя пример аналогичного использования выключателей "Электрон", может быть распространен и на выключатели АЗ790С. Тогда временные и финансовые затраты на модернизацию системы защиты СН-0,4 кВ АЭС с целью продления срока службы будут минимизированы, в сравнении с третьим вариантом модернизации за счет замены существующих выключателей на выключатели фирмы "Schneider Electric".

Учитывая, что с помощью выключателей Compact NS фирмы "Schneider Electric" может быть реализована быстродействующая селективная защита [5], следует проанализировать достоинства и недостатки использования выключателей данной фирмы для модернизации системы защиты электроустановок СН-0,4 кВ АЭС.

Обеспечение быстродействующей, так называемой "энергетической" селективности на базе выключателей Compact NS гарантируется только при использовании на всех нижестоящих и вышестоящих ступенях защиты конкретных типоразмеров выключателей именно фирмы "Schneider Electric" [6]. Эти требования в нормативных документах "Schneider Electric" указаны в связи с тем, что принцип селективной работы указанных аппаратов основан на гармонизации динамических характеристик выключателей разных ступеней. Именно этим обусловлено, в частности, одно из требований, запрещающее использование на соседних ступенях выключателей одинакового типоразмера, даже с разными значениями рабочего тока. Вторым требованием реа-

лизации быстродействующей селективной защиты на базе выключателей Compact NS является необходимость использования даже на последней ступени защиты выключателей только данной фирмы. Это значит, что должна быть полностью изменена вся структура защиты электроустановок СН-0,4 кВ АЭС, то есть, заменены не только селективные выключатели А3790С и ВА55А31, но фидерные А3710 и АП-50Б. Очевидно, что финансовые и временные затраты на такую модернизацию будут значительными, в то время как защитные характеристики быстродействующей селективной защиты, фактически, будут такими же, как и при использовании МУЗ. При этом в выключателях фирмы "Schneider Electric" нет функции идентификации вида тока возмущения цепи для повышения чувствительности к токам удаленного КЗ. Поэтому применение на первой ступени выключателей Masterpac фирмы "Schneider Electric" вместо "Электрон" не решает проблемы "дальнего резервирования" для удаленных от источников питания участков электроустановки.

Выводы. Анализ существующих проблем в реализации "дальнего резервирования" защиты в электроустановках СН-0,4 кВ АЭС показал:

1. Вследствие низкой чувствительности к токам удаленных КЗ не обеспечивается необходимая точность и надежность защиты участка электроустановки в конце магистрального шинопровода.

2. Из-за технически некорректной защитной характеристики существующей "ступенчато-временной" селективности, чем ближе расположен аппарат к источнику тока, тем больше время срабатывания защиты, термическая устойчивость кабелей в кабельных отсеках не отвечает требованиям пожарной безопасности.

3. Для решения обозначенных проблем в защите электроустановок СН-0,4 кВ АЭС разработаны новые микропроцессорные устройства защиты с усовершенствованными защитными характеристиками:

- усовершенствованная защита, основанная на избирательном повышении чувствительности к токам удаленных КЗ;

- быстродействующая интегральная селективная защита, при реализации которой время срабатывания защиты на верхних (ближе к источнику) ступенях защиты может снижаться или оставаться на том же уровне, необходимом для защиты нижних ступеней защиты (дальше от источника).

4. В результате модернизации электроустановок СН-0,4 кВ АЭС за счет реализации новых видов защит:

- существенно снижаются времена срабатывания защиты на всех ступенях, как в штатном режиме, так и в режиме "дальнего резервиро-

вания", а, соответственно, значительно снижаются термические воздействия на элементы электроустановки как от протекающего тока КЗ, так и от воздействия электрической дуги;

- значительно повышается чувствительность защиты к токам удалённых КЗ, исключая как случаи возможного отказа защиты, так и ложного её срабатывания;

- после модернизации всей системы защит за счет применения МУЗ полностью сохранится существующая структура системы защиты без замены выключателей всех ступеней;

5. В случае модернизации с теми же конечными техническими показателями за счет применения выключателей фирмы "Schneider Electric" необходимо полностью изменить всю структуру электроустановок СН-0,4 кВ АЭС (заменить аппараты всех ступеней и шкафы).

С учётом вышеизложенных соображений можно констатировать, что предлагаемая модернизация электроустановок СН-0,4 кВ АЭС за счет применения микропроцессорных устройств с новыми видами защит потребует значительно меньших временных и финансовых затрат, по сравнению с другими вариантами модернизации, в том числе и за счет применения выключателей фирмы "Schneider Electric".

Список литературы: 1. Правила устройства электроустановок. Издательство "Форт", 2009. – 699 с. 2. *Сосков А.Г., Кобозев А.С.* Модернизация системы защиты городских электрических сетей 0,4 кВ за счет использования микропроцессорной техники в расцепителях выключателей / Світлотехніка та електроенергетика. – 2010. – №2. – С. 53-63. 3. *Вольдек А.И.* Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. Учебн заведений. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с. 4. *Райнин В.Е., Кобозев А.С.* Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения / Электротехника. – 2009. – №2. – С. 44-51. 5. Руководство по устройству электроустановок. Технические решения "Шнейдер Электрик" / Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – 469 с. 6. Координация защит низкого напряжения / Техническая коллекция Schneider Electric. – 2008. – № 3. – 47 с.

Поступила в редколлегию 01.12.2012

В.Ф. БОЛЮХ, д.т.н., проф., НТУ "ХПИ"

ОМАР БЕНАЙССА, к.т.н., доц., Universite M'hamed Bougara de Boumerdes, Бумердес, Алжир

С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ"

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Предложен метод выбора геометрических параметров ферромагнитного сердечника индукционно-динамического устройства, основанный на введении комплексного критерия эффективности и оптимизационном подходе, при котором учитываются электродинамические показатели, массогабаритные параметры и магнитные поля рассеяния. Установлены оптимальные геометрические параметры ферромагнитного сердечника.

Ключевые слова: геометрические параметры, ферромагнитный сердечник, индукционно-динамическое устройство.

Запропоновано метод вибору геометричних параметрів феромагнітного осердя індукційно-динамічного пристрою, заснованому на введенні комплексного критерію ефективності та оптимізаційному підході, при якому враховуються електродинамічні показники, масогабаритні параметри та магнітні поля розсіювання. Визначені оптимальні геометричні параметри феромагнітного осердя.

Ключові слова: геометричні параметри, феромагнітний сердечник, індукційно-динамічний пристрій.

A method of choosing the geometric parameters of the ferromagnetic core of an induction-dynamic device, based on the introduction of systematic criteria and optimization-dimensional approach, which takes into account electromagnetic indicators, weight and dimension parameters and magnetic stray field is proposed. The optimum geometrical parameters of the ferromagnetic core have been found.

Key words: geometrical parameters, the ferromagnetic core, induction-dynamic device.

Введение. Индукционно-динамические устройства (ИДУ) широко используются в промышленных и научно-технических системах, где необходимы ударные механические нагрузки, при относительно незначительных перемещениях исполнительного ударного элемента. Возбуждаемый от емкостного накопителя энергии индуктор ИДУ

в электропроводящем массивном якоре индуцирует ток, обуславливающий возникновение электродинамических усилий (ЭДУ), передаваемых от якоря на исполнительный ударный элемент. Применение ферромагнитного сердечника (ФС) позволяет увеличить силовые показатели и уменьшить поля рассеяния ИДУ. Однако при этом ухудшаются массогабаритные показатели устройства. Поэтому задача выбора параметров ФС требует комплексного рассмотрения с учетом различных разнородных факторов ИДУ.

Анализ литературы. ИДУ используются во многих отраслях промышленности, науки и техники для механической обработки поверхностей, деформации объектов, проведения вибрационных и ударных испытаний и т.д. [1-4]. Однако традиционные ИДУ в основном функционируют без ФС, что обусловлено ограничениями по массо-габаритным показателям и импульсным характером электромагнитных процессов. Известны различные подходы, направленные на повышение удельных силовых показателей ИДУ, например, использование криогенного охлаждения, применение якоря специальной конфигурации, использование многосекционного индуктора с последовательной коммутацией секций, применение подвижного индуктора, взаимодействующего с двумя охватывающими якорями и др., которые требуют существенного усложнения конструкции и условий работы [5, 6]. При этом вопрос о применении относительно простого и недорогого ФС в рассматриваемых ударных устройствах с обоснованием его основных параметров практически не исследован.

Целью работы является разработка методики и определение оптимальных геометрических параметров ФС при ограничении массово-габаритных показателей и обеспечении максимальных силовых параметров при минимальных полях рассеяния ИДУ.

Математическая модель ИДУ. Для расчета рабочего цикла ИДУ при фиксированных параметрах ФС было проведено компьютерное моделирование в программном пакете *COMSOL Multiphysics 4.3*, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов.

С использованием условия Дирихле на границах расчетной области в цилиндрической системе координат рассчитывается векторный магнитный потенциал A

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $\mu(B)$ – магнитная проницаемость материала ФС, γ – электропроводность материала активных элементов ИДУ.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d(rA)}{dr}; \quad B_r = -\frac{dA}{dz}. \quad (2)$$

Локальная плотность тока в каждом конечном элементе якоря определяется по известному выражению

$$j = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (3)$$

Сила, действующая на якорь, рассчитывается по формуле:

$$f_z = 0,5 \oint (H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)) dS, \quad (4)$$

где S – поверхность, ограничивающая якорь в пространстве $\{r, z\}$.

Для ферромагнитного материала сердечника используется нелинейная кривая намагничивания $B=f(H)$.

Импульс ЭДУ, действующий на якорь, определяется выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (5)$$

При расчете переходных электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов ИДУ предполагается отсутствие механических перемещений и деформации элементов. При этом рассчитывается пространственное распределение индуцированного тока в якоре на каждом временном шаге.

Геометрические параметры ИДУ. Основные параметры базового варианта ИДУ без ФС представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные параметры базового варианта ИДУ без ФС.

Показатель	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора	D_{ex1}	100 мм
Внутренний диаметр индуктора	D_{in1}	10 мм
Высота индуктора	H_1	10 мм
Внешний диаметр якоря	D_{ex2}	100 мм
Внутренний диаметр якоря	D_{in2}	10 мм
Высота якоря	H_2	3 мм
Расстояние между индуктором и якорем	δ	1 мм
Количество витков индуктора	N_1	46 шт
Сечение шины индуктора	$a \times b$	$1 \times 4,8 \text{ мм}^2$
Емкость ЕНЭ	C	2850 мкФ
Зарядное напряжение ЕНЭ	U_0	400 В

Коаксиальный ФС 3 можно представить состоящим из дискового основания 3а, охватывающего индуктор 1 снизу, наружной обечайки 3b и внутреннего цилиндра 3с (рис. 1). Якорь 2 взаимодействует с немагнитными диском и бойком 4, выполненными, например, из нержавеющей стали.

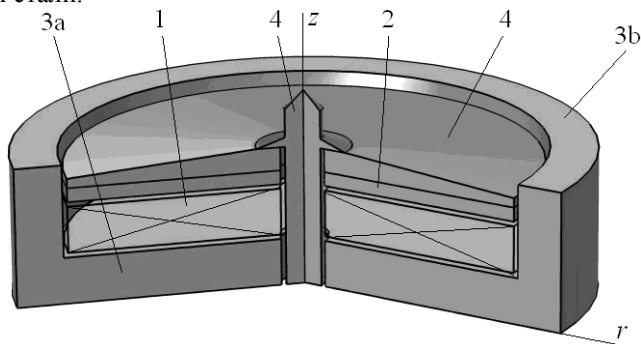


Рис. 1 – Общий вид ИДУ с ФС.

На рис. 2 показано поперечное сечение рассматриваемого ИДУ с указанием геометрических параметров ФС и распределением магнитного поля в момент максимума ЭДУ.

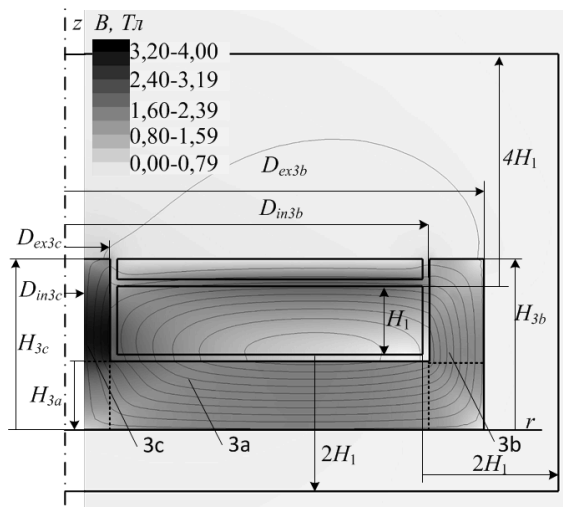


Рис. 2 – Сечение ИДУ с указанием геометрических параметров ФС.

На расстоянии $2H_1$ от нижней и боковой и на расстоянии $4H_1$ от верхней стенок индуктора жирной линией очерчена область, на которой определяется усредненное значение полей рассеяния ИДУ.

ФС, представляемый совокупностью i -ых цилиндрических участков, где $i=\{a, b, c\}$, описывается внешним диаметром D_{ex3i} , внутренним диаметром D_{in3i} и высотой H_{3i} каждого участка. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС заполнено изоляцией толщиной $\delta=1$ мм. Геометрические параметры ФС опишем следующими безразмерными параметрами:

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1}; \quad \varepsilon = \frac{H_{3b}}{H_1}; \quad \psi = \frac{D_{in3c}}{D_{in1}}; \quad \theta = \frac{D_{ex3b}}{D_{ex1}}. \quad (6)$$

Рассмотрим шихтованный ФС, выполненный из стали Ст. 10 (AISI 1010, UNS G10100), при отсутствии в нем вихревых токов.

Введем относительные параметры и показатели ИДУ:

$$F_{zm}^* = \frac{F_{zmi}}{F_{zm0}} - 1; \quad m_3^* = \frac{m_0}{m_i} - 1; \quad j_{1m}^* = \frac{j_{1mi}}{j_{1m0}} - 1; \quad (7)$$

$$B^* = \frac{B_0}{B_i} - 1; \quad G_H^* = \frac{H_{3mi}}{H_1} - 1; \quad G_D^* = \frac{D_{ex3bi}}{D_{ex2}} - 1,$$

где F_{zm0} , m_0 , j_{1m0} , B_0 – соответственно максимальное значение импульса ЭДУ, масса ИДУ, максимальное значение плотности тока в индукторе и среднее значение индукции магнитного поля рассеяния базового ИДУ; F_{zmi} , m_i , j_{1mi} , B_i – соответственно максимальное значение импульса ЭДУ, масса ИДУ, максимальное значение плотности тока в индукторе, среднее значение индукции магнитного поля рассеяния i -й конфигурации ИДУ с ФС; $H_{3m} = \max\{H_{3b}, H_{3c}, (H_1 + \delta + H_2)\}$ – максимальные аксиальные габариты ИДУ.

Полученные при изменении геометрических параметров ФС силовые (F_{zm}^*), массо-габаритные (m_3^* , G_H^* , G_D^*), экологические (B^*) и токовые (j_{1m}^*) параметры приведены к базовому варианту и представлены на рис. 3 в виде функциональных зависимостей от соответствующего безразмерного геометрического параметра.

Для оценки эффективности ФС с учетом разнородных показателей используем оптимизационный подход [7].

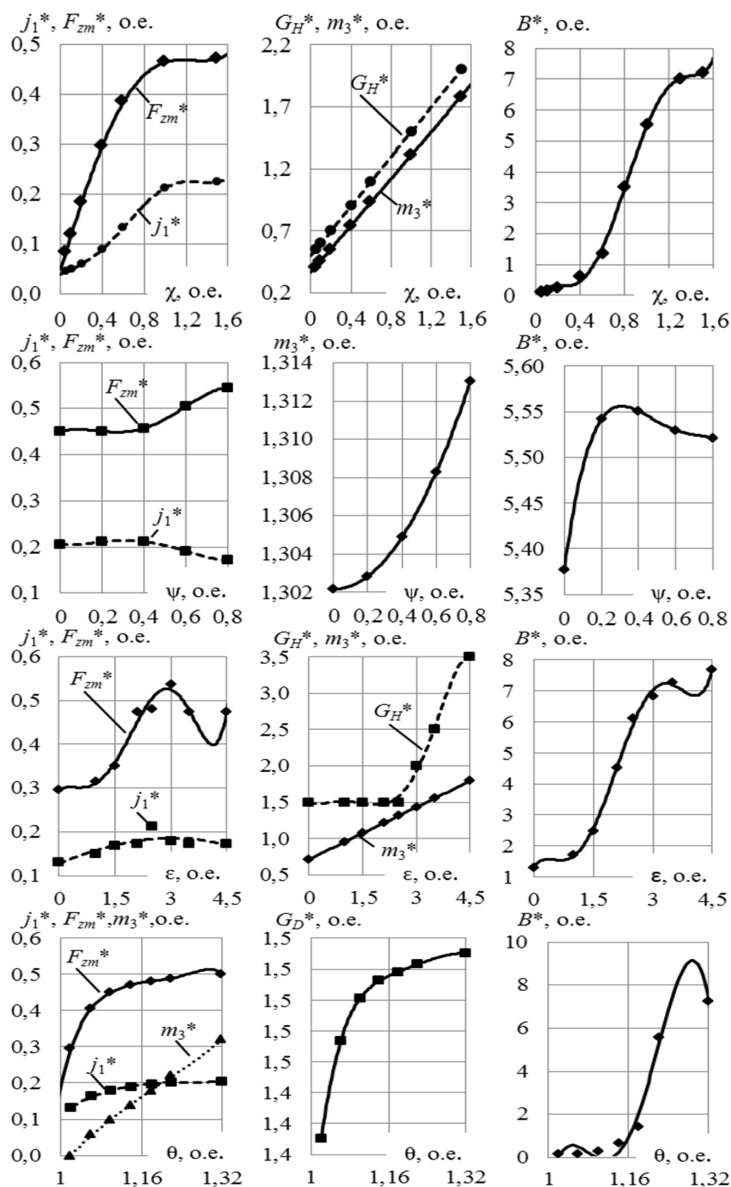


Рис. 3 – Зависимость относительных показателей ИДУ от геометрических параметров ФС.

Критерии эффективности ФС ИДУ. Для анализа введем комплексный критерий эффективности ФС ИДУ

$$\eta^* = 0,25 \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^6 \beta_i K_{ji} \quad (8)$$

где K_{ji} – i -ый частичный критерий эффективности при j -м вариационном безразмерном параметре ψ , θ , χ , ε ; K_{j1} – критерий импульса ЭДУ F_{zm}^* ; K_{j2} – критерий массы ИДУ m_3^* ; K_{j3} – критерий максимальной плотности тока в индукторе j_{1m}^* ; K_{j4} – критерий магнитного поля рассеяния; $K_{j5,6}$ – критерии аксиальных и радиальных габаритов ИДУ G_H^* , G_D^* ; β_i – весовые коэффициенты частичных критериев, удовлетворяющие соотношению

$$\sum_{i=1}^5 \beta_i = 1. \quad (9)$$

Каждый из частичных критериев описывается полиномной функцией n -го порядка от соответствующего геометрического параметра ФС:

$$\begin{aligned} K_{1,1} &= FI^*_{\chi} = 0,3507\chi^4 - 0,8763\chi^3 - 0,0417\chi^2 + 1,4465\chi + 0,1085; \\ K_{1,2} &= m^*_{\chi} = 0,5292\chi + 0,2043; \\ K_{1,3} &= j^*_{\chi} = 1,0972\chi^5 - 3,7555\chi^4 + 3,6807\chi^3 - 0,7191\chi^2 + 0,4628\chi + 0,1818; \\ K_{1,4} &= B^*_{\chi} = 3,5687\chi^5 - 13,718\chi^4 + 17,692\chi^3 - 8,2867\chi^2 + 1,558\chi - 0,0563; \\ K_{1,5} &= G_H^*_{\chi} = 0,5\chi + 0,25; \\ K_{1,6} &= G_D^*_{\chi} = \text{const}; \\ K_{2,1} &= FI^*_{\psi} = -3,7517\psi^4 + 5,7696\psi^3 - 2,2684\psi^2 + 0,2583\psi + 0,8184; \\ K_{2,2} &= m^*_{\psi} = 0,013\psi^2 + 0,994; \\ K_{2,3} &= j^*_{\psi} = 5,6081\psi^4 - 8,66\psi^3 + 3,2755\psi^2 - 0,1968\psi + 1,198; \\ K_{2,4} &= B^*_{\psi} = -0,397\psi^4 + 0,95\psi^3 - 0,8097\psi^2 + 0,2755\psi + 0,9689; \\ K_{2,5} &= G_H^*_{\psi} = \text{const}; \\ K_{2,6} &= G_D^*_{\psi} = \text{const}; \\ K_{3,1} &= FI^*_{\varepsilon} = -0,0206\varepsilon^3 + 0,1122\varepsilon^2 - 0,0171\varepsilon + 0,5252; \\ K_{3,2} &= m^*_{\varepsilon} = 0,133\varepsilon + 0,3969; \\ K_{3,3} &= j^*_{\varepsilon} = 0,0152\varepsilon^4 - 0,1393\varepsilon^3 + 0,3658\varepsilon^2 - 0,1737\varepsilon + 0,6012; \\ K_{3,4} &= B^*_{\varepsilon} = 0,0106\varepsilon^5 - 0,1086\varepsilon^4 + 0,3397\varepsilon^3 - 0,269\varepsilon^2 + 0,0682\varepsilon + 0,1697; \\ K_{3,5} &= G_H^*_{\varepsilon} = -0,0061\varepsilon^5 + 0,058\varepsilon^4 - 0,1673\varepsilon^3 + 0,1801\varepsilon^2 - 0,0611\varepsilon + 0,4283; \\ K_{3,6} &= G_D^*_{\varepsilon} = \text{const}; \\ K_{4,1} &= FI^*_{\theta} = 52,203\theta^3 - 190,58\theta^2 + 231,73\theta - 92,888; \\ K_{4,2} &= m^*_{\theta} = -56,306\theta^4 + 271,64\theta^3 - 491,08\theta^2 + 394,37\theta - 117,74; \\ K_{4,3} &= j^*_{\theta} = 24,511\theta^3 - 91,908\theta^2 + 115,02\theta - 47,055; \\ K_{4,4} &= B^*_{\theta} = 7466,8\theta^5 - 44799\theta^4 + 107106\theta^3 - 127539\theta^2 + 75642\theta - 17877; \\ K_{4,5} &= G_H^*_{\theta} = \text{const}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$K_{4,6}=G_D^*=-1,38620^2+6,49390-5,1623.$$

Алгоритм поиска оптимальных параметров ФС. Для решения поставленной задачи используем симплекс-метод с ограничениями:

$$A_1x_1+A_2x_2+A_3x_3+A_4x_4+A_5x_5+A_6x_6=A_0. \quad (11)$$

где $A_1, \dots, A_6$ – множество линейно независимых векторов (совокупность геометрических параметров ФС).

Тогда уравнение:

$$A_1x_1^*+A_2x_2^*+A_3x_3^*+A_4x_4^*+A_5x_5^*+A_6x_6^*=A_0. \quad (12)$$

определяет базисное решение $x_1^*, \dots, x_6^*$.

Если решение допустимо, т.е. $x_1^* \geq 0, \dots, x_6^* \geq 0$, то базис $\{A_1, \dots, A_6\}$ образует 6-мерное пространство, в котором каждый из векторов $A_1, \dots, A_6$ единственным образом выражается через этот базис. Если A_r не входит в базис, то:

$$A_1x_{1r}+A_2x_{2r}+A_3x_{3r}+A_4x_{4r}+A_5x_{5r}+A_6x_{6r}=A_r. \quad (13)$$

где x_{ir} – соответствующие коэффициенты ($i=1, \dots, 6$).

Решение уравнения (11) обозначим как $\{x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, x'_5, x'_6\}$, тогда:

$$A_1x'_1+A_2x'_2+A_3x'_3+A_4x'_4+A_5x'_5+A_6x'_6=A_0. \quad (14)$$

Умножив уравнение (13) на x_r и вычтя полученное уравнение из уравнения (12), получим:

$$A_1(x'_1+x_r x_{1r})+A_2(x'_2+x_r x_{2r})+\dots+A_6(x'_6+x_r x_{6r})=A_0-x_r A_0. \quad (15)$$

Находим связь нового решения $x'_1, \dots, x'_6$ с базисным решением $x_1^*, \dots, x_6^*$:

$$x'_1=x_1^*-x_r, x'_2=x_2^*-x_r, \dots, x'_3=x_3^*-x_r, x_r. \quad (16)$$

Чтобы новое решение оставалось допустимым выбираем значение x_r таким, чтобы ни одна из величин $x'_i=x_i^*-x_r$ ($i=1, \dots, 6$) не стала меньше нуля. Максимальное значение переменной x_r определяется соотношением:

$$x_{r \max} = \min_i \left\{ \frac{x_i^*}{x_{ir}} \right\}. \quad (17)$$

где $x_{ir} > 0$.

Чтобы сделать новое решение базисным выводим соответствующий вектор из базиса. Новое решение приобретает вид:

$$x_1^*-x_{r \max} x_{1r}, \dots, x_5^*-x_{r \max} x_{5r}, x_{r \max}. \quad (18)$$

а новый базис – $\{A_1, \dots, A_5, A_r\}$. Для перехода от текущего решения к новому, которому отвечает большее значение целевой функции, используется критерий симплекс-разности. Новому допустимому базисному решению:

$$x_1^* - x_r, x_{1r}, \dots, x_1^* - x_r, x_{1r}, x_r. \quad (19)$$

соответствует следующее значение целевой функции:

$$z_1 = c_1(x_1^* - x_r, x_{1r}) + \dots + c_5(x_5^* - x_r, x_{5r}) + c_6 x_r = z_0 + x_r(c_6 - c_1 x_{1r} - \dots - c_5 x_{5r}). \quad (20)$$

где z_0 – значение целевой функции для начального допустимого базисного решения; $c_6 - c_1 x_{1r} - c_2 x_{2r} - \dots - c_5 x_{5r}$ – симплекс-разность для переменной x_r .

Симплекс-разность вычисляется для каждой переменной, не входящей в базисное решение, и выбирается такая небазисная переменная x_r , для которой симплекс-разность положительна и максимальна.

Расчетный алгоритм состоит из следующих этапов:

1) находим начальный базис и связанное с ним допустимое базисное решение;

2) вычисляем симплекс-разность для каждой переменной, не входящей в базисное решение;

3) вводим в базис наиболее "выгодную" переменную с максимальной положительной симплекс-разностью; ее значение $x_{r \max}$ определяют из соотношения (17) для всех $x_{ir} > 0$;

4) выводим из базисного решения переменную x_j , соответствующую значению:

$$\min_i \left\{ \frac{x_i^*}{x_{ir}} \right\} = \frac{x_j^*}{x_{jr}}. \quad (21)$$

а из базиса – вектор A_j ;

5) переходим к новой итерации.

Этапы 2-4 повторяют до тех пор, пока симплекс-разности для всех переменных, не входящих в базис, не станут отрицательными, что и будет признаком оптимальности решения.

В табл. 2 в зависимости от весовых коэффициентов частичных показателей эффективности β представлены рассчитанные оптимальные геометрические параметры ФС ε , χ , θ и ψ с указанием величины комплексного критерия эффективности ИДУ η^* .

Таблица 2 – Рассчитанные оптимальные геометрические параметры ФС.

№	β_1	β_2	β_3	β_4	$\beta_{5,6}$	ε	χ	θ	ψ	η^*
1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2,80	1,13	1,30	0,38	1,35
2	0,4	0,15	0,15	0,15	0,15	2,83	1,13	1,30	0,79	1,98
3	0,15	0,4	0,15	0,15	0,15	2,61	1,01	1,30	0,36	0,13
4	0,15	0,15	0,4	0,15	0,15	2,73	1,16	1,30	0,32	1,98
5	0,15	0,15	0,15	0,4	0,15	3,03	1,50	1,30	0,36	1,99
6	0,15	0,15	0,15	0,15	0,4	2,67	1,07	1,28	0,38	0,74

На рис. 4 представлены синтезированные с использованием данного оптимизационного подхода конфигурации ФС для вариантов 1 и 6 из табл. 2.

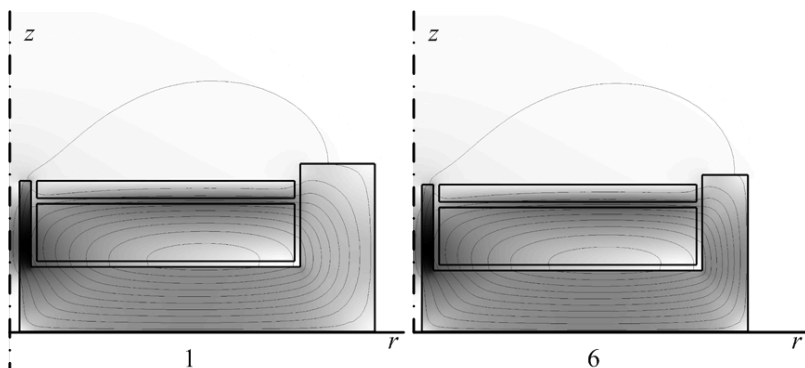


Рис. 4 – Конфигурации ФС для варианта 1 и 6 (см. табл. 2) и распределение магнитных полей ИДУ для этих вариантов.

Выводы. Предложен метод выбора геометрических параметров ФС индукционно-динамического устройства, основанный на введении комплексного критерия эффективности и оптимизационном подходе, при котором учитываются электродинамические показатели, массогабаритные параметры и магнитные поля рассеяния. Установлены оптимальные геометрические параметры ФС в зависимости от соотношения весовых коэффициентов частных критериев эффективности.

Список литературы: 1. Эффективность методов прессования корундоциркониевых порошков различной дисперсности / Анненков Ю.М., Иванов В.В., Иваишутенко А.С. и др. // Изв. Томского политехн. ун-та. 2005. Т. 308. № 7. – С. 39-42. 2. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубki-пробивки тонколистовых материалов / Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С. и др. // Металлообработка. – 2001. – №2. – С. 28-32. 3. Иваишин В.В., Иваишников Н.А., Кривонос Ю.И. Использование энергии импульсного магнитного поля для привода инструмента штамповочных машин // Прогрессивные технологии обработки материалов: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск: УНПЦ "Метолит" БГПА, 1998. – С. 61-62. 4. Пат. РФ 2248589, МПК G01V1/02. Устройство для возбуждения сейсмических волн / Чуркин И.М., Сафонов В.Н. Заявка № 2003136117/28 от 11.12.2003. – Оpubл. 20.03.2005. 5. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 5-11. 6. Патент України № 56568. Кріогенний імпульсний електромеханічний перет-

ворювач індукційного типу / *Болюх В.Ф., Любимова Л.О.* № 2002076134; Заявлено 23.07.02; Надрук. 15.05.03, Бюл. № 5. 7. *Болюх В.Ф., Назаренко С.А.* Системный подход к мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 2. – С.28-36.



Болюх Владимир Федорович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.



Омар Бенаисса, к.т.н., доцент факультета научной инженерии UMBV, Бумердес, Алжир. Защитил диплом инженера по специальности электрические машины и аппараты Запорожского машиностроительного института в 1980 г. Диссертацию по специальности электрические машины и аппараты защитил в 1984 г. в Харьковском политехническом институте. Научные интересы связаны с электрическими машинами.



Олексенко Сергей Владимирович. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2011 г. Аспирант кафедры общей электротехники НТУ "ХПИ". Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия.

Поступила в редколлегию 26.11.2012

М.В. ЧЕРНЯВСКАЯ, канд. техн. наук, доц., ХНАГХ, Харьков
И.Т. КАРПАЛЮК, канд. техн. наук, доц., ХНАГХ, Харьков
М.Л. ГЛЕБОВА, канд. техн. наук, доц., ХНАГХ, Харьков

АНАЛИЗ ВЫСШИХ ВРЕМЕННЫХ ГАРМОНИК ТОКОВ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

По статистическим моделям определены величины относительной погрешности при замене реальной кривой фазного тока статора вентильного двигателя постоянного тока на идеализированную, а также уровни высших гармоник в зависимости от параметров вентильного двигателя постоянного тока.

Ключевые слова: синхронная машина, вентильный двигатель, система дифференциальных уравнений.

По статистичних моделях визначені величини відносної похибки при заміні реальною кривою фазного струму статора вентильного двигуна постійного струму на ту, що ідеалізується, а також рівні вищих гармонік залежно від параметрів вентильного двигуна постійного струму.

Ключові слова: синхронна машина, вентильний двигун, система диференціальних рівнянь.

By statistical models the sizes of relative error are determined at substituting of the real curve of the stator phase current of a DC converter-fed motor on idealized one, and also levels of higher harmonics depending on the parameters of the DC converter-fed motor.

Key words: synchronous machine, converter-fed motor, the system of differential equations.

В теории вентильных двигателей широко используются приближенные описания фазного тока в виде трапецидальной функции времени. На этом предположении получены многие аналитические выражения для добавочных потерь, пульсирующих составляющих моментов, статических характеристик вентильных двигателей постоянного тока (ВДПТ). Поэтому, представляется целесообразным проводить анализ не только собственно гармонического состава токов ВДПТ, но и погрешности его определения по отношению к идеализированной трапецидальной кривой. Такой подход даст возможность предложить более простые и, в тоже время, более точные модели, позволяющей откорректировать приближенные зависимости.

Для трапеции, после разложения в ряд Фурье, амплитуды высших

временных гармоник (ВВГ) можно найти по формуле:

$$I_{\mu\tau} = \frac{8}{\pi\gamma_k} \cdot I_d \cdot \frac{\sin(\mu\gamma_k/2)}{\mu^2} \cdot \cos(\mu\pi/6) \quad (1)$$

где γ_k – угол коммутации; I_d – амплитуда основной гармоники; μ – номер гармоники ($\mu = 6n \pm 1, n = 1, 2, 3, \dots$).

Величину относительной погрешности определим в виде:

$$\Delta\mu = \frac{\sum_{\mu} I_{\mu}^2 - \sum_{\mu} I_{\mu\tau}^2}{\sum_{\mu} I_{\mu\tau}^2} \quad (2)$$

где $\sum_{\mu} I_{\mu}^2, \sum_{\mu} I_{\mu\tau}^2$ – сумма квадратов высших гармоник по реальной

и трапецидальной форме кривой тока соответственно. Реальная кривая тока вентильного двигателя существенно отличается от идеализированной, что подтверждается данными таблицы, рассчитанными по математической модели [1, 2], путем их сравнения с трапецидальной формой кривой тока статора по формуле (2). В таблице представлена также величина относительной погрешности $\Delta\mu$, рассчитанная по формуле (2) с разницей в том, что для ВДПТЗ – $\Delta\mu$ – включает лишь пятую и седьмую гармоники ($\mu = 5, 7$), а при ВДПТ6 – все тоже – лишь $\Delta\mu$ включает одиннадцатую и тринадцатую гармоники ($\mu = 11, 13$). В подтверждение необходимости определения величины относительной погрешности при учете высших временных гармоник тока статора ВДПТ, рассмотрим крайние значения $\Delta\mu$ и ΔI_{μ} для ВДПТЗ и ВДПТ5, в зависимости от двух групп факторов по таблице. Так, для ВДПТЗ значения крайних точек относительной погрешности равны:

а) для первой группы факторов ($\beta_0, x_{др}, i_f, i_d$)

$$\Delta\mu_{\max} = 0,74 \quad (14)$$

$$\Delta I_{\mu\max} = 1,19 \quad (14)$$

$$\Delta\mu_{\min} = 0,08 \quad (10)$$

$$\Delta I_{\mu\min} = 0,13 \quad (10)$$

где в скобках указан номер опыта, по данным которого получены соответствующие величины относительной погрешности (таблица).

б) для второй группы факторов ($x_{\sigma}, x_{сзд}, x_{ад}$)

$$\Delta\mu_{\max} = 0,49 \quad (13)$$

$$\Delta I_{\mu\max} = 0,83 \quad (13)$$

$$\Delta\mu_{\min} = 0,21 \quad (2; 14; 15)$$

$$\Delta I_{\mu\min} = 0,25 \quad (15)$$

При 6-ти фазной обмотке статора ВДПТ значения крайних точек относительной погрешности в свою очередь равны:

а) для первой группы факторов ($\beta_0, x_{др}, i_f, i_d$)

$$\begin{aligned}\Delta\mu_{\max} &= 3,45 \text{ (1)} & \Delta 1\mu_{\max} &= -0,76 \text{ (1)} \\ \Delta\mu_{\min} &= 0,062 \text{ (10)} & \Delta 1\mu_{\min} &= -0,14 \text{ (5)}\end{aligned}$$

б) для второй группы факторов ($x_{\sigma}, x_{\sigma 1,2}, x_{\sigma d}, x_{ad}$)

$$\begin{aligned}\Delta\mu_{\max} &= 0,73 \text{ (1)} & \Delta 1\mu_{\max} &= -0,51 \text{ (1)} \\ \Delta\mu_{\min} &= 0,18 \text{ (14)} & \Delta 1\mu_{\min} &= -0,24 \text{ (11)}\end{aligned}$$

Знак (–) в относительной погрешности $\Delta 1\mu$ в ВДПТ6, наблюдаемый во всех 16 опытах по каждой группе факторов, указывает на то, что трапециидальная замена формы кривой тока сказывается на учете гармоник $\mu = 12n \pm 1$, ($n = 1$) в сторону резервирования от сумм амплитуд гармоник реального фазного тока. Все данные, представленные в табл. (если умножить на 100), представляют собой выражения величин относительной погрешности в процентах. Определение ВВГ по трапеции, в ряде случаев, недопустимо, из-за чрезмерно большой величины относительной погрешности, которая может достигать 345 % (см. табл., опыт № 1, ВДПТ6; первая группа факторов – $\beta_0, x_{др}, i_f, i_d$), что в конечном итоге приводит к явному занижению реального уровня высших временных гармоник тока статора ВДПТ. Для возможности корректировки относительной погрешности расчёта уровня ВВГ по трапеции дальнейший этап обработки полученной информации, заключается в получении постоянных статистических коэффициентов уравнений описывающих функциональную зависимость y на всех принятых интервалах варьирования.

Входными параметрами для обработки программой SVD, являются матрица A и матрица – столбец исследуемой функции y , на место которой, в данном исследовании, подставлялись в порядке и соответственно табл., функции величин относительной погрешности. По сути, в таблице имеем для каждого вида эксперимента свою матрицу – столбец y и статистические уравнения можно записать, например, как:

$$y(\Delta\mu) = K_0 \beta_0^{k1} \cdot x_{др}^{k2} \cdot i_f^{k3} \cdot i_d^{k4} \quad (3)$$

и, аналогично, для других вариантов сочетания параметров, указанных в табл.

На рис. 1-8 представлены графические зависимости величин относительной погрешности $\Delta\mu$ и $\Delta 1\mu$, построенные по уравнениям (4)-(13). Здесь на одном графике представлены столько зависимостей исследуемых функций $\Delta\mu$ и $\Delta 1\mu$, сколько факторов. При построении любой зависимости от какого-либо фактора остальные принимают уровень средней точки варьирования и остаются const на всем интервале исследования.

Таблица – Величина относительной погрешности при замене реальной формы кривой тока статора на трапецию.

Фактор	Трехфазная обмотка – ВД3-				Шестифазная обмотка – ВД6-			
	$\beta_0, x_{др}, i_f, i_d$		$x_{\sigma}, x_{\sigma\Delta d}, x_{ad}$		$\beta_0, x_{др}, i_f, i_d$		$x_{\sigma}, x_{\sigma1,2}, x_{\sigma\Delta d}, x_{ad}$	
№ опыта	$\Delta\mu$	$\Delta1\mu$	$\Delta\mu$	$\Delta1\mu$	$\Delta\mu$	$\Delta1\mu$	$\Delta\mu$	$\Delta1\mu$
1	0.41	0.58	0.41	0.73	3.45	-0.76	0.73	-0.51
2	0.57	0.86	0.21	0.34	2.41	-0.74	0.39	-0.41
3	0.40	0.52	0.23	0.27	1.24	-0.65	0.33	-0.35
4	0.32	0.37	0.29	0.50	1.24	-0.58	0.51	-0.46
5	0.22	0.21	0.42	0.70	0.19	-0.14	0.51	-0.48
6	0.19	0.32	0.27	0.40	0.16	-0.23	0.30	-0.32
7	0.55	0.94	0.22	0.30	1.54	-0.63	0.30	-0.28
8	0.15	0.25	0.32	0.49	0.22	-0.25	0.43	-0.41
9	0.11	0.13	0.39	0.63	0.08	-0.15	0.46	-0.42
10	0.08	0.13	0.28	0.43	0.06	-0.16	0.32	-0.28
11	0.14	0.28	0.26	0.38	0.13	-0.24	0.30	-0.24
12	0.14	0.26	0.30	0.47	0.17	-0.21	0.40	-0.37
13	0.40	0.66	0.49	0.83	1.03	-0.60	0.60	-0.50
14	0.74	1.19	0.21	0.32	1.05	-0.56	0.18	-0.47
15	0.32	0.48	0.21	0.25	0.57	-0.50	0.32	-0.33
16	0.25	0.27	0.29	0.48	0.39	-0.27	0.39	-0.40

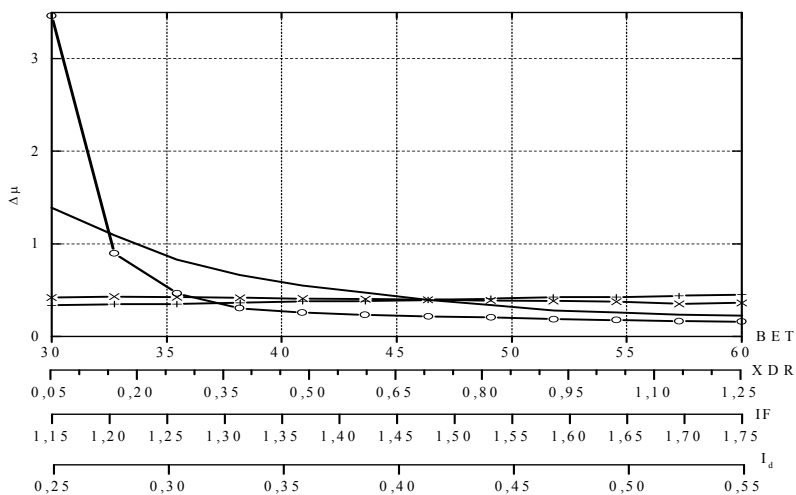


Рис. 1 – Величина относительной погрешности $\Delta\mu$ в ВДПТ6 в зависимости от факторов $\beta_0, x_{др}, i_f, i_d$ (---+--- BET, ---o--- XDR, ---x--- IF, ---●--- I_d)

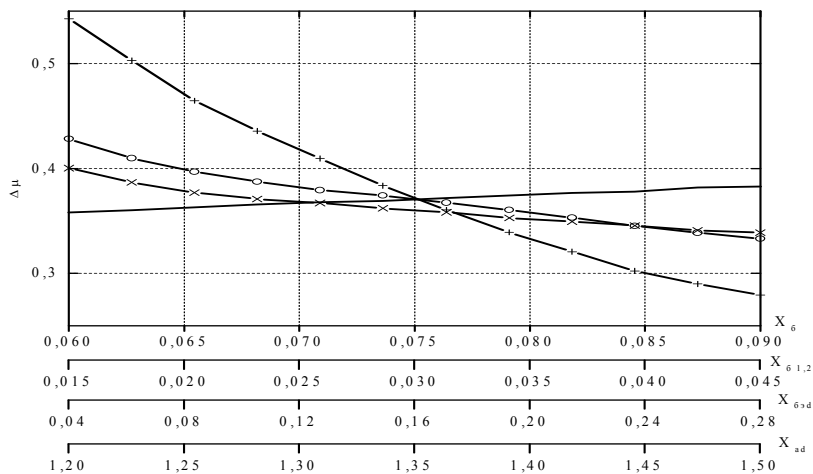


Рис. 2 – Величина $\Delta\mu$ в ВДПТ6 в зависимости от $x_\sigma, x_{\sigma 1,2}, x_{\sigma 3d}, x_{ad}$
 (---+--- – x_σ ; ---0--- – $x_{\sigma 1,2}$; ---x--- – $x_{\sigma 3d}$; ---•--- – x_{ad})

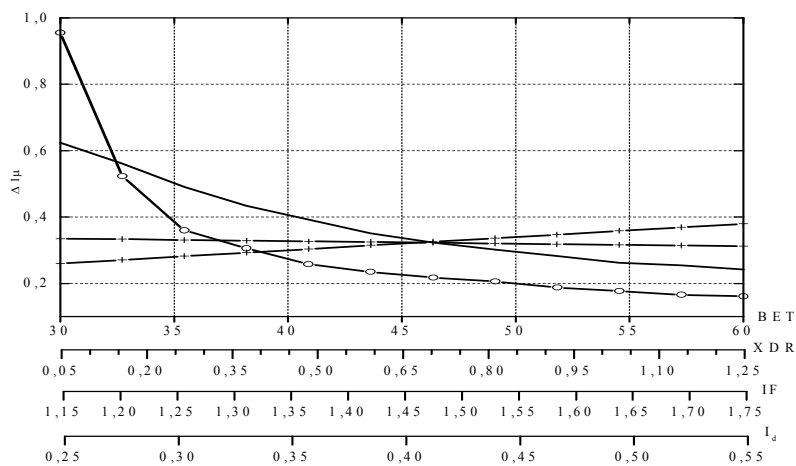


Рис. 3 – Величина $\Delta 1\mu$ в ВДПТ6 в зависимости от факторов $\beta_0, x_{др}, i_f, i_d$
 (---+--- – BET; ---0--- – XDR; ---x--- – IF; ---•--- – I_d)

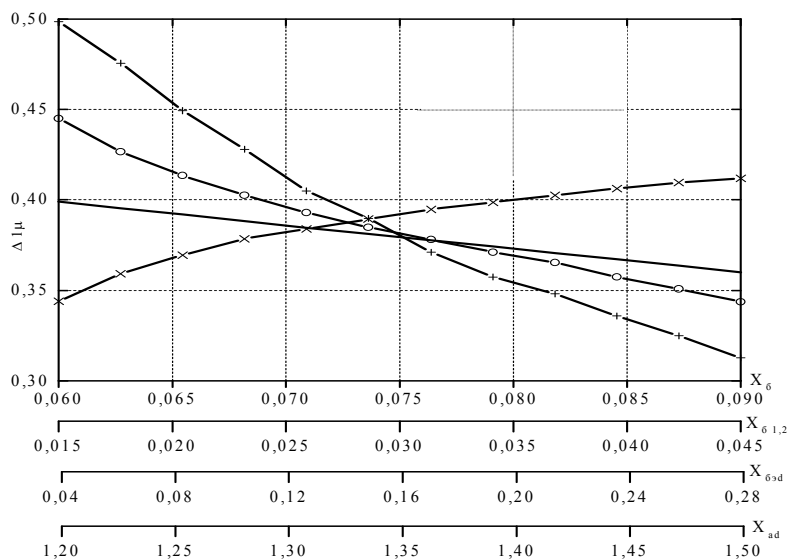


Рис. 4 – Величина $\Delta 1\mu$ в ВДПТ6 в зависимости от x_σ , $x_{\sigma 1,2}$, x_{ad} , $x_{\sigma 3d}$.
($\circ$ – $x_{\sigma 1,2}$, — x_{ad} , —x— $x_{\sigma 3d}$, —+— x_σ).

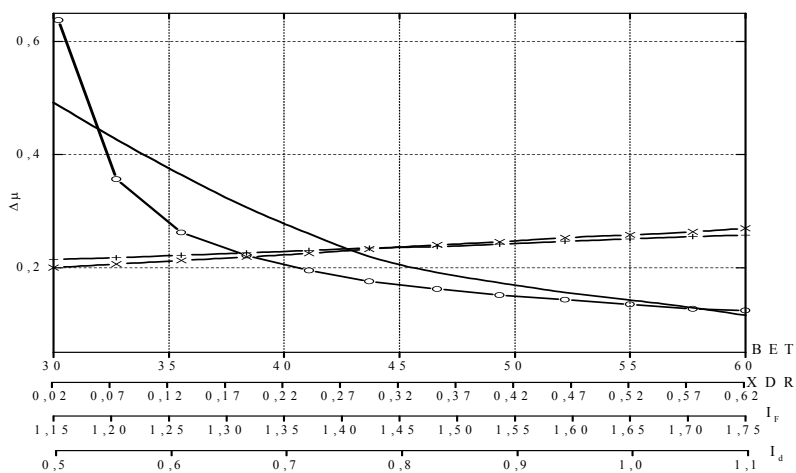


Рис. 5 – Величина относительной погрешности $\Delta\mu$ в ВДПТ3 в зависимости от факторов β_0 , $x_{др}$, i_f , i_d (---+--- – BET; ---0--- – XDR; ---x--- – IF; ---●--- – I_d).

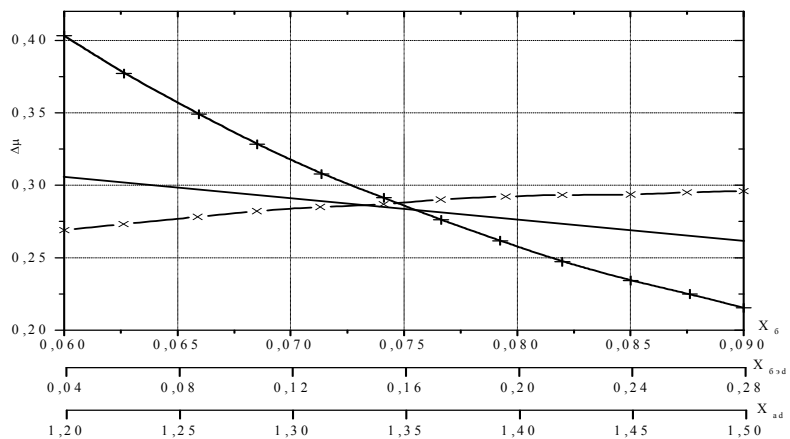


Рис. 6 – Величина $\Delta\mu$ в ВДПТЗ в зависимости от факторов x_σ , $x_{\sigma ad}$, x_{ad}
(----+---- – x_σ ; ----x---- – $x_{\sigma ad}$; ----•---- – x_{ad}).

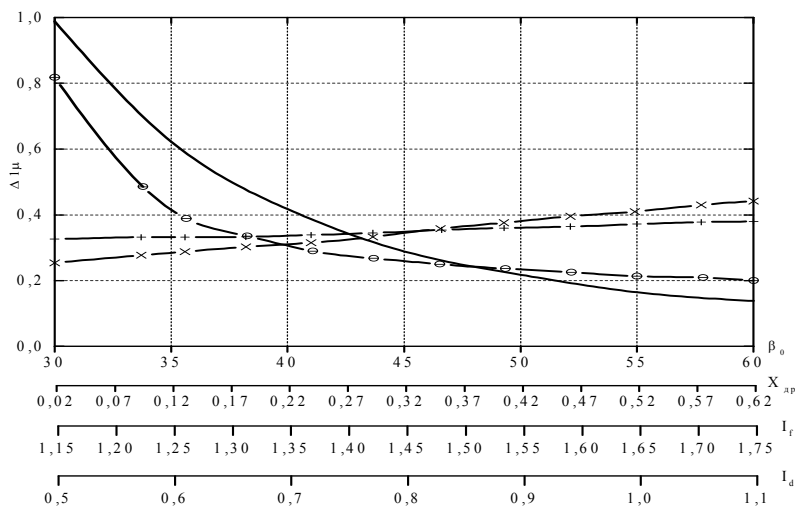


Рис. 7 – Величина $\Delta 1\mu$ в ВДПТЗ в зависимости от факторов β_0 , $x_{др}$, i_f , i_d
(----+---- – BET; ----0---- – XDR; ----x---- – I_f ; ----•---- – I_d)

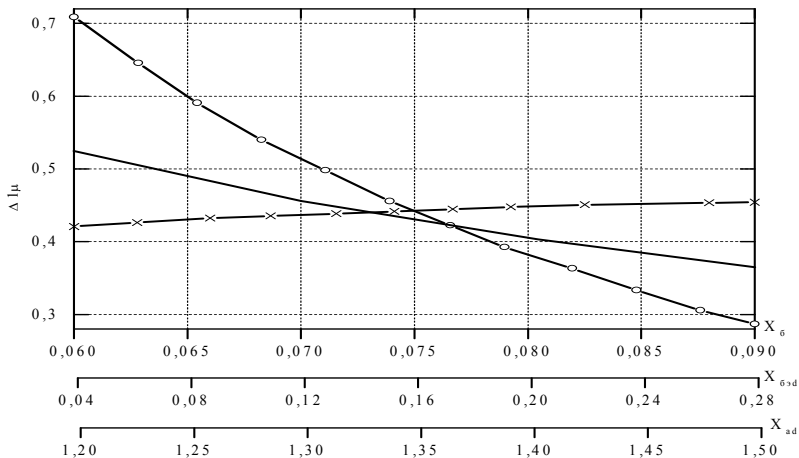


Рис. 8 – Величина относительной погрешности $\Delta \mu$ в ВДПТЗ в зависимости от факторов x_{σ} , $x_{\sigma zd}$, x_{ad} (---0--- x_{σ} , ----X---- $x_{\sigma zd}$, -----●----- x_{ad})

Кроме статистических моделей по определению величин относительной погрешности при замене реальной формы кривой тока статора ВДПТ на трапециидальную, представляет интерес также уровень самих высших временных гармоник. Наличие статистических моделей для их определения дает возможность прогнозировать с достаточной точностью величины амплитуд ВВГ без применения сложных математических методов.

Разработанные статистические модели для расчета формы кривой тока якоря отличаются простотой и инженерной применимостью на первом этапе создания ВДПТ.

Список литературы: 1. Волчуков Н.П. Цифровое моделирование высокоиспользуемых автономных систем электромеханического преобразования энергии: Дис.д-ра техн. наук: 05.09.01. – Х., 1996. – 424с. 2. Русаков А.М., Соломин А.Н., Окунева Н.А., Шатова И.В. Математическая модель электромагнитных процессов в вентильном двигателе Вестник Московского энергетического института. – 2007. – № 3. – С. 33-40.

Поступила в редколлегию 19.10.2012



Чернявская Маргарита Васильевна, доцент, кандидат технических наук. Защитила диплом инженера, диссертацию кандидата в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты. Соответственно 1963, 1974 гг. Доцент кафедры "Информационных систем и технологий в городском хозяйстве" Харьковской национальной академии городского хозяйства с 2002 г. Интересы связаны с проблемами разработкой вентильных двигателей.



Карпалюк Игорь Тимофеевич, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера в Харьковской национальной академии городского хозяйства в 1993 г. Диссертацию кандидата по специальности светотехника та источники света в 1998 г. "Информационных систем и технологий в городском хозяйстве" Харьковской национальной академии городского хозяйства с 2002 г. Интересы связаны экономией электроэнергии, информационными технологиями и электрическими аппаратами на энергосберегающих технологиях.



Глебова Марина Леонидовна, доцент, кандидат технических наук. Защитила диплом инженера в Харьковской национальной академии городского хозяйства в 1983 г. Диссертацию кандидата в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты в 2001 г. Доцент кафедры "Теоретической и общей электротехники" Харьковской национальной академии городского хозяйства. Интересы связаны с проблемами разработкой вентильных двигателей.

В.В. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОСТИ ИХ ЗАМЕНЫ ИЛИ РЕАБИЛИТАЦИИ

Оценка необходимости останова турбогенераторов для ремонта или его замены на блоке станции проводится по результатам анализа многих факторов. Сбор и последующий анализ перечисленных выше факторов позволят оценить серьезность проблемы и пути восстановления генератора или установить необходимость его замены.

Ключевые слова: ремонт, реабилитация, продление срока эксплуатации.

Оцінка необхідності зупинки турбогенераторів для ремонту або його заміни на блоці станції проводиться за наслідками аналізу багатьох чинників. Збір і подальший аналіз перерахованих вище чинників дозволить оцінити серйозність проблеми і шляхи відновлення генератора або встановити необхідність його заміни.

Ключові слова: ремонт, реабілітація, продовження терміну експлуатації.

The assessment of the necessity to stop the turbogenerators for repair or its replacement on the block of the station is carried out by results of the analysis of many factors. The collection and subsequent analysis of above-mentioned factors will allow to assess the seriousness of the problem and ways of renewal of the generator or to determine the necessity of its replacement.

Key words: repair, rehabilitation, life extension.

Введение. Требования энергоресурсосбережения, тенденции изменения мировой структуры энергетического баланса в сторону повышения его эффективности, увеличения использования местных и возобновляемых источников энергии, повышения экологичности энергетической отрасли – наиболее серьезные проблемы для национального производителя электроэнергии. Основные требования исследования и управления энергетикой, выбора сценария ее дальнейшего развития, независимо от времени и геополитического положения государства, следующие [1]:

1) определение и внедрение оптимальных темпов и пропорций развития всех компонентов энергосистемы;

2) своевременное внедрение элементов новой техники, которые могут обеспечить решение задач научно-технического прогресса, создание условий для современной разработки и освоения этой техники;

3) обеспечение наиболее эффективного использования основных материальных, энергетических и трудовых ресурсов;

4) обеспечение надежной работы, качественной и современной диагностики состояния энергетического оборудования энергосистем с учетом его физического состояния.

Последнее предполагает развитие систем и методов определения или необходимости замены, или установление возможности продления срока службы генераторов, что возможно установить по оценке технических показателей состояния их основных узлов. Для оценки состояния генераторов устанавливают их наиболее уязвимые элементы, оценивают и ранжируют отдельные параметры конструкции, тип монтажа обмотки статора, сердечников статора и ротора, их основные показатели и историю работы, результаты визуальных осмотров, послеремонтных испытаний и испытаний в режиме on-line. Также необходимы данные о состоянии механических элементов, режимных параметров генератора, которые могут повлиять на надежность работы и установления требований к объему необходимого ремонта (восстановления), т.е. для объективной оценки состояния генератора, определения необходимости проведения, объему ремонтных работ и разработки рекомендаций по продлению срока службы генератора.

Учитывая преобладающий вклад в суммарную выработку электроэнергии Украины ТЭС и АЭС, наибольший интерес представляет проведение анализа состояния турбогенераторов, (ТГ), и обеспечивающего оборудования электростанций. При этом специалисты оценивают состояние классических ТЭС, как близкое к технической катастрофе: уже в 2006-2007 гг. появились сообщения, что на 104 энергетических блоках ТЭС, работающих на угле, 96 % оборудования полностью отработало проектный ресурс, а 73 % – превысили граничный ресурс, к тому же КПД станций снизился до 30-35 %, [2-4]. Кроме того, на многих ТЭС отсутствуют газоочистные сооружения, что приводит к значительному выбросу в атмосферу оксидов азота, двуокиси серы и т.д.

Цель статьи: предложить методы оценки состояния ТГ, устанавливающих необходимость их замены или возможность продления срока службы. Методы базируются на рассмотрении технических показателей и критериев, которые позволяют определить состояние узлов ТГ.

Основной материал. Экономическое положение в стране делает невозможным проводить полную плановую замену электрооборудования на ТЭС, износ которого уже к 2006 г., как уже указывалось выше, оценивается в 90-100 %, [3, 4]. Поэтому необходимо искать новые методы, которые позволят продлить срок эксплуатации ТГ путем прове-

дения их реабилитации. Для этого необходимо применять новые системы диагностики. Но если есть возможность замены устаревших ТГ, следует использовать новые решения, например, устанавливать более мощные машины или даже другие типы генераторов.

Состояние и срок полезной службы генератора трудно определить. Неточность диагностики (прогнозирование) может привести к большим ошибкам в определении необходимых материальных вложений и значительным материальным потерям из-за увеличения случаев принудительного отключения (аварийных отказов).

Более точная и объективная оценка состояния узлов ТГ позволит оптимизировать инвестиции на проведение основных ремонтных работ – замену, модернизацию и проведение капитальных ремонтов.

Предлагаемый метод основан на оценке целого ряда показателей, значительно повышает точность исследований, облегчает сравнение генераторов, установленных на электростанции или в энергосистеме, позволяет выбрать приоритетное направление необходимых ремонтных работ. Необходимо рассматривать характеристики рабочих режимов генератора, проводить оценку состояния сердечника статора и ротора, механических элементов генератора, определять его влияние на работу электросети, знать количество пусков и т.п.

Снижение электрической и механической надежности отдельных узлов генератора, которые подлежат частой проверке, может быть оценена во время профилактических ремонтов, которые проводятся согласно графику планово-предупредительных ремонтов (каждые 3-5 лет). Однако внешний осмотр, который проводится при этих ревизиях, не дает окончательных данных о возможных отказах элементов генератора и поэтому они могут быть установлены только тогда, когда произойдет реальный отказ отдельных узлов генератора и поставить под угрозу безопасность персонала. Проведение ремонтов оборудования должно выполняться по плану, за исключением случаев аварийных ситуаций, таких как, например, короткое замыкание в обмотке статора, или разрушение вала. Проведение плановых профилактических испытаний и выявление признаков деградации отдельных узлов очень важно, чтобы определить оптимальный срок начала ремонта генератора.

Главные причины отказов имеют электрическую или механическую природу. Основные из них следующие:

- уменьшение сопротивления изоляции обмотки якоря, электрического сопротивления обмотки и коэффициента адсорбции;
- увеличение токов утечки;

- увеличение рабочих температур и неравномерности воздушного зазора;
- увеличение разности фазовых токов обмотки статора, частичных разрядов, уменьшение полного сопротивления обмотки возбуждения;
- возрастание вибраций вала.

Капитальный ремонт необходимо проводить, когда показатели промежуточных плановых испытаний показывают, что параметры генератора достигли критических значений или когда частые поломки показывают снижение его надежности.

Время эксплуатации (возраст) генератора не является единственным критерием для установления сроков проведения ремонтов. Но является главным критерием в оценке состояния конструктивных элементов, например, состояния трущихся элементов, элементов, работающих при постоянном воздействии вибрации и повышенного нагрева. При оценке влияния времени эксплуатации ТГ также следует учитывать тип конструкции, например, конструкцию обмоток статора и ротора, тип изоляции, способ крепления статора на фундаменте и т.п. Опыт эксплуатации показывает, что капитальные ремонты необходимы для генераторов, которые проработали свыше 40 лет. Поэтому диагностике и ремонту подлежат все элементы генератора, а не только те, которые определили необходимость останова на ремонт.

Перечислим главные критерии, которые определяют необходимость полного ремонта генератора:

1. значительные нарушения в состоянии обмотки статора;
2. увеличение числа и продолжительности вынужденных остановок генератора из-за повторяющихся аварий обмотки статора, витковых замыканий в обмотке ротора, появления трещин и разрывов в элементах механических компонентов, утечки масла и т.п. Ремонты этих элементов дорогие, т.к. они обычно требуют демонтажа генератора;
3. деформация сердечника статора и воздушного зазора. Наиболее часто это вызывается смещением или подвижкой элементов крепления узлов генератора. Для минимизации или даже исключения этих проблем используют регулируемые закладные пластины и радиальную клиновку. Вызванное деформацией касание вращающегося ротора о статор может привести к самым нежелательным последствиям.

На эксплуатационный срок работы ТГ влияет частое изменение режимов работы и появление режимных ограничений. Проявление

этих ограничений приводит к снижению вырабатываемой мощности и вызывает перегрев ТГ, избыточную вибрацию, межкатушечные замыкания и другие проблемы. Недовыдача электроэнергии приводит к значительным материальным потерям.

Координация проведения работ по механическим испытаниям, оценке состояния электрических цепей, общему состоянию генератора позволит сократить стоимость ремонтных работ, продолжительность их проведения, время останова генератора.

Проводя полные ремонтные работы, следует, используя последние достижения, провести следующие действия:

- 1) повысить мощность генератора (и турбины) за счет использования современных материалов, характеризующиеся высокой надежностью, низким уровнем старения во время эксплуатации и возможностью рециклинга. Все это позволит увеличить эксплуатационную надежность генератора и ограничить до минимума объем последующих необходимых осмотров;

- 2) модернизировать вспомогательное оборудование и аппаратуру;

- 3) заменить изоляцию полюсов, чтобы обеспечить возможность включения новых статических возбудителей.

- 4) модернизировать или организовать систему принудительной подачи масла в подшипники (гидроподъем);

- 5) повысить пожаробезопасность ТГ, установить современную систему пожаротушения;

- 6) увеличить величину воздушного зазора между статором и ротором в местах его уменьшения, исключить причину появления этого уменьшения и т.д.

Кроме того, при проведении ремонтных работ следует учитывать различные ограничения местного и временного характера: высокий спрос на электроэнергию в зимнее время; возникающую необходимость эксплуатации с перегрузкой параллельно работающих генераторов для обеспечения достаточной суммарной выработки электроэнергии электростанцией. Поэтому выбор конкретного генератора для его длительного останова с целью восстановления или ремонта должен базироваться на конкретных факторах, главные из которых:

- 1) единичное или постоянное снижение мощности в процессе эксплуатации, что приводит к экономическим потерям;

- 2) статистические данные о возрастании частоты остановок и длительностей ремонтов в течение последних 5 лет;

- 3) потеря целостности электрических цепей обмоток статора и ротора;

- 4) нарастающий уровень вибраций, приводящий к повышению вероятности механических поломок вследствие усталости материала;
- 5) учет стратегической важности конкретной электростанции для обеспечения надежной работы местной энергосистемы и поддержания надежности работы системы при перераспределении энергии в сети.

При оценке состояния ТГ и определения необходимости его останова для капитального ремонта или замены важно правильно оценить ее необходимость, т.к. замена многих элементов, как, например, сердечника и обмоток статора, дорогая процедура. Главные компоненты генератора – статор, ротор и структурные механические компоненты активной и неактивной зоны. Состояние ротора легче диагностировать и выполнение его ремонта более доступно, поэтому результирующее время его эксплуатации может быть большим, чем статора. Структурные элементы проще и не так часто нуждаются в ремонтах.

Выводы. Оценка необходимости останова генератора для ремонта или его замены проводится по результатам анализа многих факторов, которые можно объединить в пять основных групп:

- 1) тип конструкции и история изготовления;
- 2) история эксплуатации и обслуживания (ремонт, аварии, плановые и аварийные остановы);
- 3) результаты внешних осмотров,
- 4) результаты послеремонтных и производственных испытаний;
- 5) данные о режимах эксплуатации.

Сбор и последующий анализ перечисленных выше факторов позволят оценить серьезность проблемы и пути восстановления генератора. Каждому показателю следует дать оценку, просуммировать результаты для каждого узла и получить общее представление о состоянии генератора. Рейтинг каждого компонента конструкции ТГ даст представление о необходимости и объеме проведения работ.

Иногда, даже если в результате обследования получено, что генератор находится в хорошем или отличном состоянии, может быть установлено, что некоторый из основных или вспомогательных узлов нуждаются в немедленном ремонте или восстановлении.

Список литературы: 1. Шевченко В.В., Лизан И.Я., Зиновьев С.Н. Ядерная энергетика Украины и экологическая безопасность: проблемы и перспективы // Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв, 2011, Красноармійськ. – С. 288-296. 2. Шевченко В.В. Перспективная оценка совершенствования энергетической системы Украины // Электрика (Россия, Москва), № 9. – 2012. – С. 10-15. 3. Шевченко В.В. Проблемы и основные направле-

ния развития электроэнергетики в Украине // Энергетика та електрифікація, № 7(287), 2007. – С. 11-16. 4. Шевченко В.В. Пути преодоления возможного энергокризиса в энергосистеме Украины // Збірник наукових праць Донецького Інституту залізничного транспорту, № 29, 2012. – С. 77-81. 5. Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Минко А.Н. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов. – Харьков: Изд-во "СПДФЛ Частышев А.В." – Моногр. – 2012. – 248 с.

Поступила в редколлегию 14.11.2012



Шевченко Валентина Владимировна, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры электрических машин НТУ "ХПИ". В 1977 г. защитила диплом инженера-физика по специальности "Криогенная техника" в ХПИ им. В.И. Ленина. В 1981 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в Ленинградском политехническом институте по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты, в 1986 г. получила аттестат доцента по кафедре "Электрические машины и аппараты". В 2011 г. защитила диплом на квалификацию международного педагога (IGIP). Область научных интересов – энергосбережение в электроэнергетике, надежности и реабилитации турбогенераторов тепловых и атомных станций, ветроэнергетика, использование высокотемпературных сверхпроводников в электроэнергетических установках.

Е.И. БАЙДА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗГОНА
МАКРООБЪЕКТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

В статье анализируются теоретические возможности по разгону макрообъектов с помощью электромагнитного поля за счет подключения устройства к источнику постоянного напряжения или накопительному конденсатору.

Ключевые слова: рельсотронный ускоритель, электромагнитное поле, постоянное напряжение, накопительный конденсатор.

У статті аналізуються теоретичні можливості по розгону макрооб'єктів за допомогою електромагнітного поля за рахунок підключення пристрою до джерела постійної напруги або накопичувального конденсатора.

Ключові слова: рельсотронний прискорювач, електромагнітне поле, постійна напруга, накопичувальний конденсатор.

The paper analyzes the theoretical possibilities for acceleration macro object electromagnetic field by connecting the device to a DC voltage or a accumulative capacitor.

Key words: rail gun accelerator, electromagnetic field, a constant voltage, the accumulative capacitor.

Введение. Идея использовать электромагнитные силы для разгона макрообъектов не нова, но в последние годы она получила новый мощный импульс в своем развитии. Кратко основные виды разгонных электромагнитных устройств, их принцип действия, достоинства и недостатки описаны в [1]. В данной статье проведен теоретический анализ наиболее перспективного разгонного устройства – рельсотронного ускорителя. Сложности создания такого ускорителя заключаются в необходимости обеспечения сверхбыстрого нарастания импульса тока в системе, обеспечивающего разгон ускоряемого устройства до его деформации или испарения. Как правило, направляющие рельсы выполняются из электротехнической меди с серебряным покрытием, а ускоряемый объект изготавливается из алюминия. Актуальность данной тематики подтверждают многочисленные исследования в лабораториях США (рис. 1) и других стран. Причем, как показывают исследования, в качестве ускоряемого объекта может выступать и плазма, которая либо "толкает" ускоряемый объект, либо сама является ускоряемым объектом.

© Е.И. Байда, 2012



Рис. 1 – Рельсотрон компании General Atomics. Фото с сайта ga.com.

Цель и задачи исследования. Цель статьи – проверка математической модели расчета и теоретический анализ возможностей разгонного устройства.

Задачи: провести расчет скорости разгона объекта при подключении электрической цепи к источнику постоянного напряжения и накопительному конденсатору.

Постановка и метод решения задачи.

Расчетные уравнения [2]:

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \cdot U) &= 0; \\ \sigma \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) &= -\sigma \cdot \nabla \cdot U; \\ m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + C_x \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{dx(t)}{dt} &= F_l, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ – проводимость; $\vec{A}$ – векторный магнитный потенциал; U – напряжение источника; m – масса разгоняемого объекта; $x(t)$ – путь разгоняемого объекта; C_x – коэффициент лобового сопротивления; ρ – плотность воздуха; S – поперечное сечение разгоняемого тела; F_l – сила Лоренца.

В случае подключения к системе накопительной емкости, напряжение определяется как:

$$U = U_{c0} - \frac{1}{C} \cdot \int_t \left(\iint_S \vec{j}(t) \cdot d\vec{S} \right) \cdot dt, \quad (2)$$

где U_{c0} – начальное напряжение на емкости; C – емкость конденсатора; S – сечение; $\vec{j}(t)$ – полная плотность тока.

Допущения, принятые в расчете: силы трения и проходное контактное сопротивление снаряд – рельс не учитывается; проводимость материалов и плотность воздуха постоянна; коэффициент лобового сопротивления не зависит от скорости движения объекта и плотности воздуха.

В уравнениях (1) полная производная означает, что для ускоряемого объекта необходимо учитывать изменение электрического поля в зависимости от скорости движения:

$$\frac{d\vec{A}}{dt} = \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{A}, \quad (3)$$

где $\vec{v}$ – скорость движения объекта.

В качестве базового варианта, был принят расчет, приведенный в [3]. Движение снаряда задавалось экспоненциальной функцией. Результаты расчета для направляющих из меди и снаряда массой 0,17 кг из алюминия, приведены ниже. Конечный путь снаряда составлял 0,35 м, что обусловлено временем расчета и наглядностью вывода графиков.

1. *Включение на постоянное напряжение.* Расчеты проводились при постоянном напряжении 300 В. На рис. 2 показано значение скорости системы.

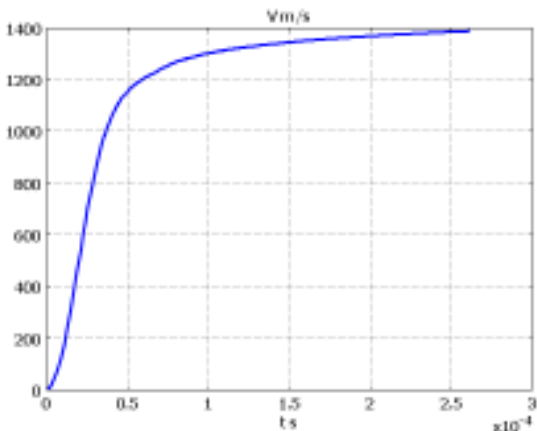


Рис. 2 – Временная зависимость скорости системы.

На рис. 3 и рис. 4 показано значения тока и силы Лоренца, которые представляют значительный интерес при расчете устройств такого рода.

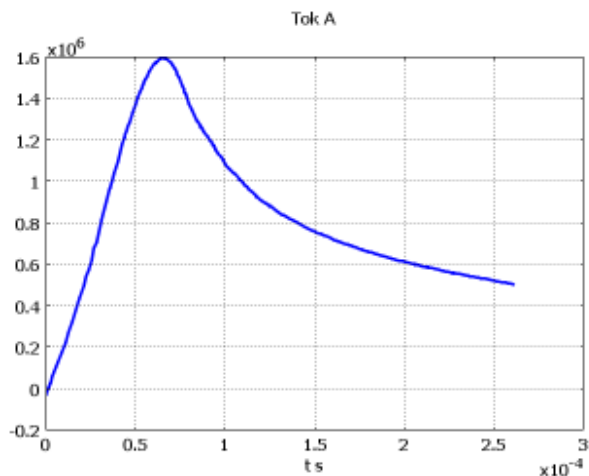


Рис. 3 – Ток системы.

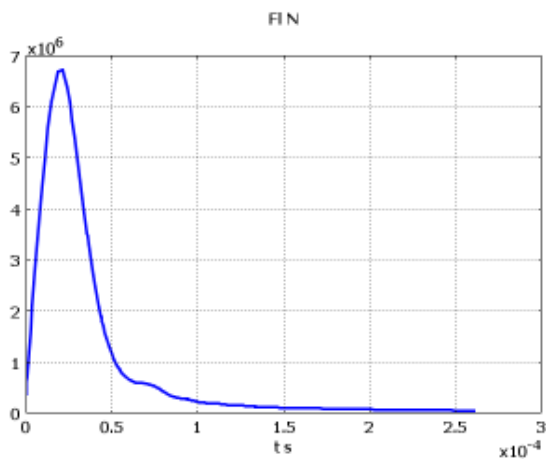


Рис. 4 – Значение силы Лоренца.

Как следует из расчетов, скорости, ток и силы в системе достаточно велики.

2. *Включение системы на накопительный конденсатор.* Напряжение на конденсаторе принималось равным 1000 В.

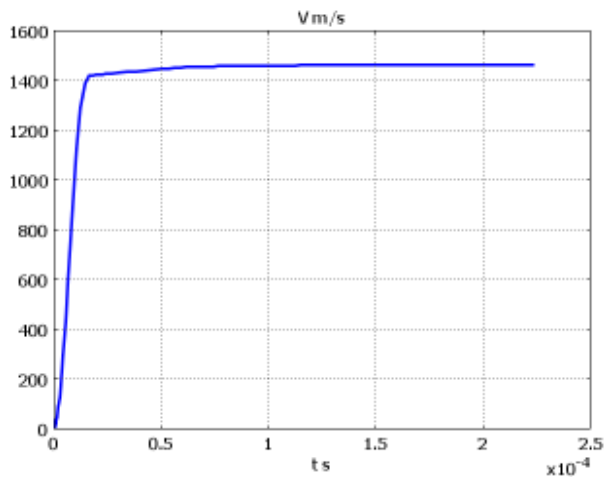


Рис. 5 – Значение скорости.

На рис. 6 и рис. 7 показаны графики значений тока и силы Лорнца.

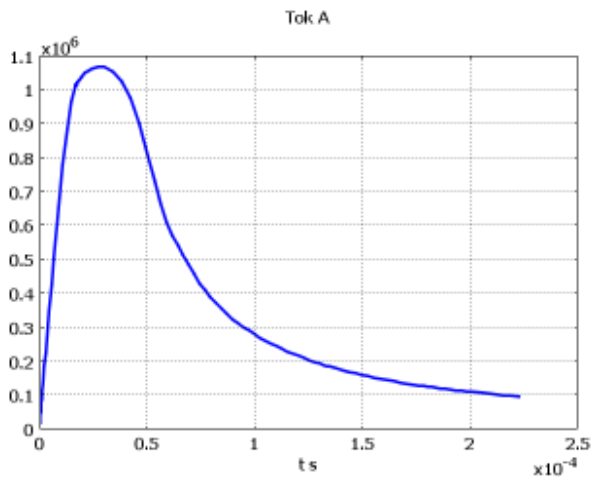


Рис. 6 – Ток системы.

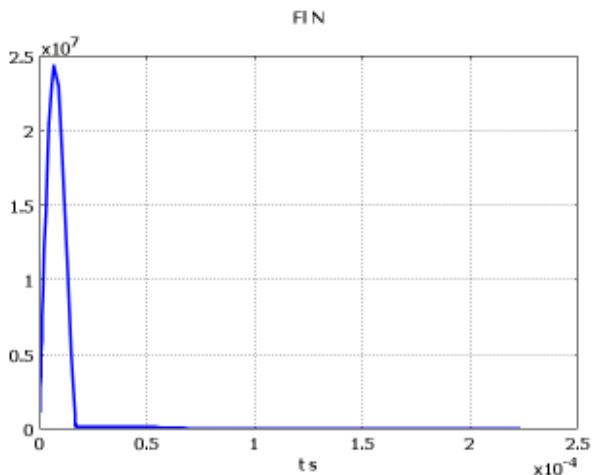


Рис. 7 – Сила Лоренца.

Выводы. Как следует из анализа данных, математическая модель дает возможность в первом приближении оценить возможности системы по разгону макрообъектов на основании уравнений электромагнитного поля, электрической цепи и механики движения.

Список литературы: 1. Болюх В.Ф. Основні напрямки розвитку електромагнітних прискорювачів // Електротехніка і електромеханіка – Харків, 2009. – № 4. – С. 7-13. 2. Рамо С., Уиннери Д. Поля и волны в современной радиотехнике. – М. – Л-д.:ОГИЗ. Главная редакция технико-теоретической литературы, 1948. – 631 с. 3. COMSOL Multiphysics. Учебные пособия на русском языке [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.comsol.com/>

Поступила в редколлегию 12.11.2012

Б.М. ГОРКУНОВ, д-р техн. наук, доц., НТУ "ХПИ";
А.А. АВРАМЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ";
С.Г. ЛЬВОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ";
И.Б. ГОРКУНОВА, аспирант, НТУ "ХПИ"

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ

В работе получены основные соотношения для определения амплитуды и фазы напряженности поля внутри изделия и определены допустимые значения вихревого тока.

Ключевые слова: амплитуда, фаза, напряженность, магнитное поле, вихревые токи.

У роботі одержано основні співвідношення для визначення амплітуди та фази напруженості поля в середині виробу та визначені допустимі значення вихрового струму.

Ключові слова: амплітуда, фаза, напруженість, магнітне поле, вихрові струми.

In this work the basic relationships to determine the amplitude and phase of the magnetic field strength inside the product are obtained and the accepted values of eddy current are determined.

Key words: amplitude, phase, magnetic field strength, magnetic field, eddy currents.

Введение. В практике электромагнитного неразрушающего контроля в последнее время широкое распространение приобрели накладные преобразователи различных типов. Это связано, прежде всего, с возможностью проведения локального контроля параметров, бесконтактностью электромагнитного метода и его высокой производительностью [1-3].

Принципиальной особенностью рассмотренных в литературе накладных преобразователей является то, что ими определяются электромагнитные характеристики, усредненные по объему изделия. Эти усредненные значения могут отличаться от величин характеристик определяемых, например, вдоль или поперек направления проката. В связи с этим для решения различных практических задач имеет

смысл определять свойства изделий в заданном направлении. Это особенно важно при наличии анизотропии характеристик. Оказывается, что если использовать однородное магнитное поле и разделить функции создания магнитного потока и измерения характеристик изделий, то можно определять направленные свойства изделий.

Основная часть. Рассмотрим задачу проникновения поперечного однородного переменного магнитного поля в цилиндрическое токопроводящее изделие, что в конечном итоге позволит определять технические возможности электромагнитных методов и устройств. Все необходимые обозначения приведены на рис. 1.

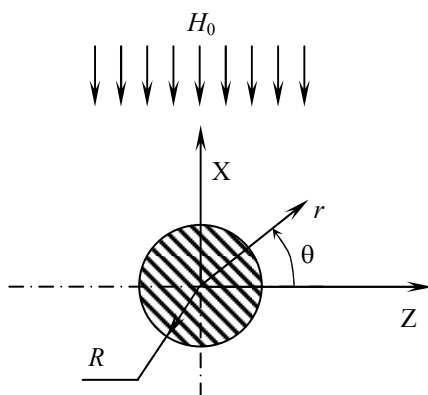


Рис. 1 – Цилиндрическое токопроводящее изделие в поперечном однородном магнитном поле.

Напряженность внешнего возбуждающего поля H_0 направлена перпендикулярно к оси цилиндра. Такое направление внешнего поля возбуждает в изделии дипольный вихревой ток, который протекает вдоль координаты Y .

Для определения выражений, описывающих распределение амплитуды и фазы напряженности магнитного поля внутри цилиндрического образца, воспользуемся уравнениями Максвелла [2], которые имеют вид:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \sigma \bar{E} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля; t – время; B – магнитная индукция; σE – плотность тока; σ – удельная электрическая проводимость.

Примем, что возбуждающее поле считается квазистационарным, и волновыми процессами в диэлектрической среде пренебрегают ввиду того, что размеры контролируемых изделий значительно меньше длины волны при используемых частотах внешнего поля. Так как напряженность магнитного поля невелика, то можно считать, что магнитная проницаемость $\mu_r = \text{const}$. Кроме того, предполагается, что материал изделия характеризуется постоянным значением σ .

С учетом принятых допущений последним слагаемым в правой части уравнения (1) можно пренебречь.

В цилиндрической системе координат уравнения (1), (2) сводятся к системе уравнений

$$\frac{\partial j}{\sigma \partial r} = \frac{\partial B_\theta}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial j}{r \sigma \partial \theta} = -\frac{\partial B_r}{\partial t}, \quad (4)$$

где B_θ , B_r , E_y – составляющие индукции (напряженности) электромагнитного поля вдоль соответствующих координат.

Продифференцировав уравнение (1) по времени и используя выражения (3), (4), получим дифференциальное уравнение для плотности продольного тока

$$\frac{\mu_r}{\sigma} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial j}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 j}{\partial \theta^2} \right] = \frac{\partial j}{\partial t}, \quad (5)$$

Решение этого уравнения для случая $r \leq R$ получим в виде:

$$j = \frac{\partial N}{\partial t} I_1(kr) \sin \theta \quad (6)$$

где N – комплексная константа; I_1 – модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка; $k = \sqrt{2i} / \delta$; δ – глубина проникновения.

Для случая $r \geq R$ электромагнитное поле является потенциальным, то есть удовлетворяет уравнению $\text{rot} H = 0$, или $H = \text{grad } \Omega$, где потенциал Ω находится из выражения:

$$\Omega = H r \cos \theta + C \cos \frac{\theta}{r}. \quad (7)$$

Здесь C – константа. В цилиндрической системе координат справедливы выражения

$$H_r = \frac{\partial \Omega}{\partial r}, \quad H_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta}, \quad (8)$$

где H_r и H_θ – составляющие напряженности магнитного поля.

Используя (3), (4) и (8), получим:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r \sigma} \frac{\partial j}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta}, \quad (9)$$

$$-\frac{1}{\sigma r} \frac{\partial j}{\partial \theta} = \frac{\partial \Omega}{\partial r}. \quad (10)$$

Подставив выражения (6) и (7) в уравнения (9) и (10) и решая эту систему при $r = R$, получим выражения для определения констант N и C

$$N = \frac{2H_0 \mu_r R \sigma}{kR \left[I_0(kR) + \frac{\mu_r + 1}{kR} I_1(kR) \right]}, \quad (11)$$

$$C = H_0 R^2 \left\{ \frac{2\mu_r I_1(kR)}{kR \left[I_0(kR) + \frac{\mu_r - 1}{kR} I_1(kR) \right]} \right\}, \quad (12)$$

В дальнейшем будем использовать понятие напряженности поперечного магнитного поля, выражение для которой имеет вид [4, 5]:

$$H_1 = H_r \sin \theta - H_\theta \cos \theta, \quad (13)$$

в области $r \leq R$

$$H_1 = H_0 \frac{I_0(kR) - I_2(kR) \cos 2\theta}{I_0(kR) + \frac{\mu_r - 1}{kR} I_1(kR)}, \quad (14)$$

а для $R \leq r \leq \infty$

$$H_1 = H_0 \left[1 - \frac{I_2(kR) - \frac{\mu_r - 1}{kR} I_1(kR)}{I_0(kR) + \frac{\mu_r - 1}{kR} I_1(kR)} \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta \right], \quad (15)$$

где I_0 , I_1 и I_2 модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого, первого и второго порядков.

В практике неразрушающего контроля и измерений используется выражение для напряженности результирующего поперечного переменного магнитного поля снаружи изделия, так как оно характеризует реакцию цилиндрического объекта на возбуждающее внешнее поле.

Для немагнитного изделия ($\mu_r \approx 1$) выражение (15) упрощается

и принимает вид:

$$H_1 = H_0 \left[1 - \frac{I_2(kR)}{I_0(kR)} \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta \right], \quad (16)$$

Характерной особенностью выражений для расчета внешней напряженности магнитного поля (см. формулы (15) и (16)) является зависимость величины $\dot{H}_1$ от угловой координаты θ .

Найденные электромагнитные параметры соответствуют определенным глубинам проникновения магнитного поля в изделие, которые задаются частотой зондирующего поля. Если глубина проникновения магнитного поля соизмерима или незначительно отличается от радиуса изделия, то можно определить среднее по сечению образца значение продольной σ . Однако, варьируя частотой возбуждающего поля, то есть, изменяя глубину проникновения, можно определять средние значения σ по каждой из этих глубин, и в результате оценить картину распределения величины σ по сечению изделия. В частности, представляет практический интерес оценка отклонений усредненной величины σ (низкие частоты) от величины σ в поверхностных слоях (высокие частоты). Эта задача интересна тем, что вследствие различных видов обработок (механических, термических и других) структура поверхностных слоев изделия значительно искажается по сравнению с внутренними областями. А последнее обстоятельство может привести к изменению σ . В качестве масштаба глубины проникновения может быть использован параметр $\delta = \sqrt{2/(\mu_0 \mu_r \sigma \omega)}$. Для практики представляет интерес относительная глубина проникновения, то есть $\Delta = \delta/R$. В таком случае обобщенный параметр x выражается, как $x = \sqrt{2}/\Delta$. Таким образом, регулируя частоту возбуждающего поля можно получать величины Δ (а, следовательно, и x), обеспечивающие рациональные режимы работы устройств. В этом случае удобно использовать переменнo-частотный метод при разностных фазовых измерениях.

Степень нагрева изделия зависит от величины и закона распределения по сечению плотности вихревых токов.

Предельное значение напряженности магнитного поля можно оценить для каждого конкретного материала по допустимой плотности вихревых токов. Для этого необходимо ввести безразмерный комплексный параметр L , характеризующий собой относительный полный вихревой ток в изделии

$$L = \frac{4I}{RH_0}, \quad (17)$$

откуда

$$I = RH_0 x^2 \frac{I_1(x\sqrt{i})L_0(x\sqrt{i}) - I_0(x\sqrt{i})L_1(x\sqrt{i})}{ix^2 \left[I_0(x\sqrt{i}) + \frac{\mu_r - 1}{x\sqrt{i}} I_1(x\sqrt{i}) \right]}, \quad (18)$$

где $L_0(x\sqrt{i})$, $L_1(x\sqrt{i})$ – функции Струве нулевого и первого порядков.

На рис. 2 а, б приведены зависимости амплитуды и угла сдвига по фазе относительно H_0 параметра L от x при $\mu_r = 1$.

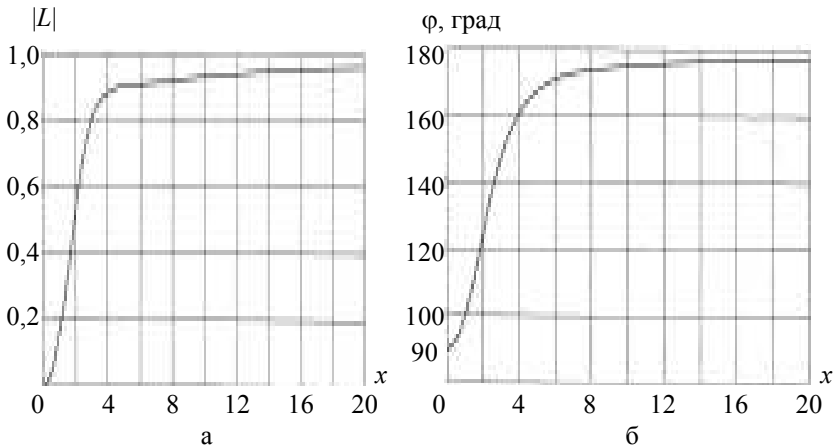


Рис. 2 – Зависимость амплитуды и фазы относительного полного вихревого тока от величины x : а – амплитуда; б – фаза.

Формулы для расчета этих параметров имеют вид:

для $x \leq 10$

$$|L| = \frac{1}{\mu_r + 1} x^2 \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2}{B_3^2 + B_4^2}}; \quad (19)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{B_1/B_2 + B_4/B_3}{1 - \frac{B_1 B_4}{B_3 B_2}}, \quad (20)$$

где B_1 , B_2 , B_3 и B_4 удобно определять при $x \leq 10$ для $n = 9$ из соотношений

$$B_1 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{x}{2}\right)^{4n}}{(4n+3)(2n)!(2n+1)!}; \quad (21)$$

$$B_2 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{x}{2}\right)^{4n+2}}{(4n+5)(2n+1)!(2n+2)!}; \quad (22)$$

$$B_3 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mu_r + 4n + 1}{\mu_r + 1} \frac{(-1)^n \left(\frac{x}{2}\right)^{4n}}{(2n)!(2n+1)!}; \quad (23)$$

$$B_4 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mu_r + 4n + 3}{\mu_r + 1} \frac{(-1)^n \left(\frac{x}{2}\right)^{4n+2}}{(2n+1)!(2n+2)!}, \quad (24)$$

для $x \geq 10$

$$|L| = \sqrt{\frac{B_5^2 + B_6^2}{B_7^2 + B_8^2}}; \quad (25)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{B_5/B_6 + B_7/B_8}{1 - \frac{B_5 B_8}{B_6 B_7}}. \quad (26)$$

Величины B_5 , B_6 , B_7 и B_8 вычисляются из

$$B_5 = 1 - \frac{7}{8\sqrt{2}x} + \frac{957}{1024x^3} + \frac{81258}{32768x^4} + \sqrt{\frac{2\pi}{x}} e^{-\frac{x}{\sqrt{2}}} \sin\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \frac{\pi}{8}\right), \quad (27)$$

$$B_6 = \frac{7}{8\sqrt{2}x} + \frac{71}{128x^2} + \frac{957}{1024\sqrt{2}x^4} + \sqrt{\frac{2\pi}{x}} e^{-\frac{x}{\sqrt{2}}} \cos\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \frac{\pi}{8}\right), \quad (28)$$

$$B_7 = \frac{8\mu_r - 7}{8\sqrt{2}x} - \frac{48\mu_r - 57}{128x^2} - \frac{120\mu_r - 195}{1024\sqrt{2}x^3}, \quad (29)$$

$$B_8 = 1 + \frac{8\mu_r - 7}{8\sqrt{2}x} + \frac{120\mu_r - 195}{1024\sqrt{2}x^3} + \frac{3360\mu_r - 9035}{3268x^4}. \quad (30)$$

Если определять среднюю плотность тока как отношение полного вихревого тока к площади кольца с шириной равной глубине проникновения магнитного поля δ (что разумно по физическим соображениям)

ям), то эту среднюю плотность вихревых токов можно сравнить с допустимой для каждого конкретного материала. Последнее приводит к условию ограничения H_0 исходя из допустимой плотности тока $j_{\text{доп}}$, которое имеет вид:

$$H_0 \leq \frac{j_{\text{доп}} \sqrt{2} \cdot 2\pi R \left(2 - \frac{\sqrt{2}}{x} \right)}{x|L|}. \quad (31)$$

Выводы. Чувствительность описанных устройств в значительной степени зависит от величины напряженности возбуждающего поля. Увеличение H_0 позволяет достигнуть при реализации методов высоких значений информационных сигналов. Последнее обстоятельство одинаково важно как для фазовых (поскольку существуют пороги чувствительностей к входным сигналам фазометров), так и для амплитудных методов. Однако, как уже указывалось при рассмотрении накладных преобразователей ограничением на величину H_0 являются тепловые эффекты нагрева изделия вихревыми токами, которые могут привести к изменению σ . Степень нагрева изделия зависит от величины и закона распределения по сечению плотности вихревых токов.

Список литературы: 1. Испытания ферромагнитных материалов / И.И. Ки-фер. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 544 с. 2. Чернышев Е.Т. и др. Магнитные измерения на постоянном и переменном токе. – Стандартгиз. – 1962. – с. 112. 3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. Ред. В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с. 4. Авраменко А.А., Себко В.П., Горкунов Б.М. Бесконтактное измерение удельной электрической проводимости // Дефектоскопия, изд-во Наука, Свердловск, № 12. – 1988. – С. 77-80. 5. Авраменко А.А., Горкунов Б.М., Львов С.Г., Скопенко В.В. Переменно-частотный вихретоковый преобразователь с поперечным полем // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2008. – № 48. – С. 144-147.

Поступила в редколлегию 19.11.2012

С.Н. ЗАХАРЧЕНКО, канд. техн. наук, Институт
электродинамики НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ ВИДА АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ НА ВЫБОР УСЛОВИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТАНТ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРАНУЛИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

Проанализированы функции, аппроксимирующие зависимости эквивалентного электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от тока в них, с точки зрения удобства их использования при решении дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в таких цепях и корректности определения начальных и специальных условий.

Ключевые слова: нелинейное сопротивление, аппроксимация, переходный процесс.

Проаналізовано функції, які апроксимують залежності еквівалентного електричного опору гранульованих струмопровідних середовищ від струму в них з точки зору зручності їх використання у розв'язанні диференціальних рівнянь, що описують перехідні процеси в таких колах і коректності визначення початкових і спеціальних умов.

Ключові слова: нелінійний опір, апроксимація, перехідний процес.

The functions approximating dependences of equivalent electric resistance of granulated current-carrying media on current in them, from the point of view of convenience of their use at the solution of the differential equations describing transients in such circuits and a correctness of definition of initial and special conditions are analyzed.

Key words: nonlinear resistance, approximation, transient.

Введение. Искроэрозионные процессы, происходящие в гранулированных токопроводящих средах в результате протекания импульсных токов, лежат в основе технологий производства порошков тугоплавких и многокомпонентных сплавов [1], обеззараживания и комплексной очистки водных стоков [2], а также получения ультрадисперсных гидрозолей биологически активных металлов [3]. Анализ и оптимизация электромагнитных процессов в цепях, содержащих такие нагрузки, невозможны без адекватного описания их электрических свойств. В [4] были предложены несколько классов функций, аппроксимирующих зависимость сопротивления такой среды от протекающего в ней импульсного

тока, которые подбирались, исходя из соответствия экспериментальных зависимостей графикам функций в заданных режимами технологического процесса интервалах изменения аргумента.

В настоящей работе проанализируем выбранные в [4] функции с точки зрения возможности задания начальных условий и удобства их применения в дифференциальных уравнениях, описывающих переходной процесс разряда емкостного накопителя энергии в выходной цепи генератора импульсов с такой нагрузкой.

Схема замещения выходной цепи генератора импульсов. Эквивалентная схема замещения выходной цепи генератора импульсов с емкостным накопителем энергии C и искроэрозионной нагрузкой, R_H , при замкнутом разрядном коммутаторе представлена на рис. 1. R_0 моделирует постоянную составляющую сопротивления нагрузки, а $R_*(i)$ – зависимую от тока составляющую ее сопротивления. Индуктивность соединительных кабелей обозначена L , сопротивление шунтирующего резистора – R_{III} , ток в нем – i_{III} , ток емкостного накопителя – i , а ток нагрузки – i_H .

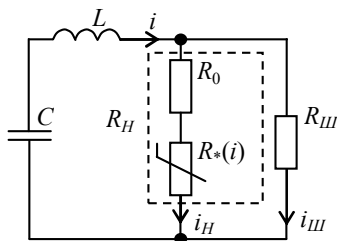


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения выходной цепи генератора импульсов.

Резистор R_{III} необходим для гарантированного обеспечения нулевых условий разряда конденсатора C к моменту начала следующего цикла при самопроизвольном возрастании сопротивления нагрузки R_H на порядки [5]. Это крайне важно для обеспечения безаварийных режимов работы некоторых преобразователей, работающих на такую нагрузку, например, для обратных [6], а также генераторов импульсов с зарядным и разрядным

тиристорными коммутаторами [7]. На основе последних построен генератор разрядных импульсов установки искроэрозионной обработки гранулированных токопроводящих сред, на которой проводилась серия экспериментов для определения зависимости сопротивления нагрузки от протекающего в ней импульсного тока [4].

Анализ функций аппроксимации сопротивления нагрузки. Функции, аппроксимирующие зависимость эквивалентного электрического сопротивления слоя алюминиевых гранул в воде от протекающего в нем импульсного тока по данным [4], а также корректные начальные условия для тока нагрузки и его первой производной по времени приведены в табл. 1. При этом использовались следующие обозначе-

ния: $a_0, a_1, a_2 \dots$ – коэффициенты аппроксимирующих функций; Q_0 – начальный заряд конденсатора C ; ω_0 – угловая частота собственных колебаний в цепи.

Как видно из табл. 1, все аппроксимирующие функции можно условно разделить на несколько групп. Первая группа состоит из двух характеристик, представляющих собой алгебраические полномы второй и пятой степени, соответственно (№ 1, № 2). Начальные условия в обоих случаях одинаковы. Аппроксимация экспоненциальной функцией (№ 3) предполагает наличие отличного от предыдущих случаев начального условия по первой производной тока в нагрузке, поскольку в нем в явном виде присутствует зависимость от коэффициента a_1 .

Таблица 1 – Аппроксимирующие функции.

№ пп	Аппроксимирующая функция	Начальные условия по току	Начальные условия по первой производной тока
1	2	3	4
1.	$R_H = a_0 + a_1 i_H + a_2 i_H^2$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	$\left. \frac{di_H}{dt} \right _{t=0} = -Q_0 \omega_0^2 \cdot \frac{R_{ш}}{R_0 + R_{ш}}$
2.	$R_H = a_0 + a_1 i_H + a_2 i_H^2 +$ $+ a_3 i_H^3 + a_4 i_H^4 + a_5 i_H^5$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	$\left. \frac{di_H}{dt} \right _{t=0} = -Q_0 \omega_0^2 \cdot \frac{R_{ш}}{R_0 + R_{ш}}$
3.	$R_H = a_0 +$ $+ a_1 \exp(- i_H /a_2)$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	$\left. \frac{di_H}{dt} \right _{t=0} = -Q_0 \omega_0^2 \cdot \frac{R_{ш}}{R_0 + R_{ш} + a_1}$
4.	$R_H = a_0 + a_1 (1 - \ln i_H)$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	–
5.	$R_H = a_0 +$ $+ a_1 (1 - \log_{a_2} i_H)$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	–
6.	$R_H = a_0 +$ $+ a_1 (1 - \ln i_H) + a_2 i_H $	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	–
7.	$R_H = a_0 + \frac{a_1}{\ln i_H + a_2}$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	$\left. \frac{di_H}{dt} \right _{t=0} = -Q_0 \omega_0^2 \cdot \frac{R_{ш}}{R_0 + R_{ш}}$

Окончание табл. 1.

1	2	3	4
8.	$R_H = a_0 + \frac{a_1}{\ln i_H + a_2 }$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	$\frac{di_H}{dt}\Big _{t=0} = -Q_0\omega_0^2 \cdot \frac{R_{ш} \ln a_2}{(R_0 + R_{ш}) \ln a_2 + a_1}$
9.	$R_H = a_0 + \frac{a_1}{\sqrt{ i_H }}$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	—
10.	$R_H = \frac{a_2 \left(a_0 + \frac{a_1}{ i_H } \right)}{a_0 + \frac{a_1}{ i_H } + a_2}$	$i _{t=0} =$ $= i_H _{t=0} = 0$	$\frac{di_H}{dt}\Big _{t=0} = -Q_0\omega_0^2 \cdot \frac{R_{ш}}{R_0 + R_{ш}}$
11.	$R_H = a_0 + \frac{a_1}{ i_H }$	—	—
12.	$R_H = a_0 + a_1 i_H ^{-1,5}$	—	—
13.	$R_H = a_0 + \frac{a_2}{i_H^2}$	—	—
14.	$R_H = a_0 + \frac{a_1}{ i_H } + \frac{a_2}{i_H^2}$	—	—
15.	$R_H = a_0 + \frac{a_1}{ i_H } + \frac{a_3}{ i_H ^3}$	—	—

Третья группа включает аппроксимацию логарифмическими функциями (№ 4, № 5) и сумму логарифмической и линейной функций (№6). Эта группа имеет корректное начальное условие по току и некорректное по первой производной (поскольку $\ln 0 = \infty$). Следующая группа состоит из аппроксимаций с помощью обратных логарифмических функций (№ 7, № 8). В обоих случаях начальные условия по току в нагрузке и его первой производной корректны, однако для аппроксимации № 7 начальные условия для производной по току (как и случаях № 1 и № 2) зависят только от линейной части сопротивлений R_H и $R_{ш}$, а в случае № 8 зависит также от коэффициента при нелинейной части сопротивления R_H .

Случаи № 9, 10, 12-15 представляют собой аппроксимации гиперболами разных степеней и суммами гипербол. При этом только в случае № 9 существует корректное начальное условие по току. Все это указывает на то, что в большинстве приведенных аппроксимаций не существует корректных начальных условий. Выделение корректных граничных условий также является проблематичным.

Случай № 11 учитывает как сопротивление слоя металлических гранул в соответствии с аппроксимацией № 10, так и лианеризованное сопротивление воды, в которую этот слой погружен (коэффициент a_2). В соответствии с функцией № 11 сопротивление жидкости подключено параллельно сопротивлению слоя гранул, состоящего из постоянной компоненты a_0 и гиперболы первой степени с коэффициентом a_1 .

Поскольку из эксперимента известно о наличии максимума i_H , в случаях, когда это необходимо для нахождения постоянных интегрирования будем пользоваться специальными условиями в точке достижения функцией $i(t)$ максимального значения:

$$i_H = I_m \Big|_{t=t_m}; \quad \frac{di_H}{dt} \Big|_{t=t_m} = 0; \quad (1)$$

$$i = I_C \Big|_{t=t_C}; \quad \frac{di}{dt} \Big|_{t=t_C} = 0, \quad (2)$$

где I_m и I_C – значения максимального тока в нагрузке и емкости соответственно; t_m и t_C – моменты времени, в которые токи достигают максимальных значений.

Заметим, что в случаях, когда при нахождении начальных условий возникали отношения неопределенностей, они раскрывались с помощью правила Лопиталья [8], например:

$$\lim_{i_H \rightarrow 0} [i_H \ln |i_H|] = \lim_{i_H \rightarrow 0} \left[\frac{\ln |i_H|}{1/i_H} \right] = \lim_{i_H \rightarrow 0} \left[\frac{1/i_H}{-1/i_H^2} \right] = 0.$$

Расчет переходных процессов в цепи. Одним из наилучших с точки зрения минимума погрешностей аппроксимации, ширины области изменения аргумента и наличия физического смысла коэффициентов является представление нагрузки в виде гиперболы первой степени [4]:

$$R_H = a_0 + \frac{a_1}{|i_H|}; \quad R_0 = a_0; \quad R_* = \frac{a_1}{|i_H|}. \quad (3)$$

Особенностью данного случая является то, что дифференциальное уравнение, описывающее переходной процесс в цепи, можно решить как относительно i_H , так и относительно i . Поскольку

$$i = i_{\text{H}} \frac{R_0 + R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}} + \frac{a_1}{R_{\text{ш}}}; \quad (4)$$

$$i_{\text{H}} = i \frac{R_{\text{ш}}}{R_0 + R_{\text{ш}}} - \frac{a_1}{R_0 + R_{\text{ш}}}, \quad (5)$$

то процессы в цепи рис. 1 согласно закону Кирхгофа описываются выражением

$$\frac{di}{dt} + i \frac{R_0 R_{\text{ш}}}{L(R_0 + R_{\text{ш}})} + \frac{1}{LC} \int i dt + \frac{R_{\text{ш}} a_1}{L(R_0 + R_{\text{ш}})} = 0; \quad (6)$$

или

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R_0 R_{\text{ш}}}{L(R_0 + R_{\text{ш}})} \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0. \quad (7)$$

Выражение (7) является обыкновенным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами и его решение имеет вид:

$$i = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (8)$$

где

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R_0 R_{\text{ш}}}{2L(R_0 + R_{\text{ш}})} \pm \sqrt{\frac{R_0^2 R_{\text{ш}}^2}{4L^2(R_0 + R_{\text{ш}})^2} - \omega_0^2}, \quad (9)$$

Заметим, что здесь и далее мы рассматриваем случай аperiodического разряда конденсатора, как наиболее часто встречающийся в режимах получения наноразмерной дисперсной фазы золей металлов. Для нахождения постоянных интегрирования, воспользуемся условиями (2). Откуда имеем:

$$C_1 = \frac{I_C \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t_C}, \quad C_2 = -\frac{I_C \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_2 t_C}. \quad (10)$$

Таким образом

$$i = \frac{I_C}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \left(\lambda_2 e^{\lambda_1(t-t_C)} - \lambda_1 e^{\lambda_2(t-t_C)} \right), \quad (11)$$

$$i_{\text{H}} = \frac{I_C R_{\text{ш}}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(R_0 + R_{\text{ш}})} \left(\lambda_2 e^{\lambda_1(t-t_C)} - \lambda_1 e^{\lambda_2(t-t_C)} \right) - \frac{a_1}{(R_0 + R_{\text{ш}})}. \quad (12)$$

Если записать уравнение (6) относительно i_{H} , то получим

$$\frac{d^2 i_{\text{H}}}{dt^2} + \frac{R_0 R_{\text{ш}}}{L(R_0 + R_{\text{ш}})} \frac{di_{\text{H}}}{dt} + \omega_0^2 i_{\text{H}} + \frac{\omega_0^2 a_1}{R_0 + R_{\text{ш}}} = 0. \quad (13)$$

Его решение имеет вид:

$$i_H = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} - \frac{a_1}{(R_0 + R_{\text{ш}})}, \quad (14)$$

где $i_q = -a_1/(R_0 + R_{\text{ш}})$ – частное решение уравнения (13).

Постоянные интегрирования будем искать в соответствии с условиями (1):

$$C_1 = \frac{\lambda_2 \left(I_m + \frac{a_1}{R_0 + R_{\text{ш}}} \right)}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t_m}, \quad C_2 = \frac{-\lambda_1 \left(I_m + \frac{a_1}{R_0 + R_{\text{ш}}} \right)}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_2 t_m} \quad (15)$$

Тогда

$$i_H = \frac{I_m + \frac{a_1}{R_0 + R_{\text{ш}}}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \left(\lambda_2 e^{\lambda_1(t-t_m)} - \lambda_1 e^{\lambda_2(t-t_m)} \right) - \frac{a_1}{(R_0 + R_{\text{ш}})}. \quad (16)$$

Приравнявая уравнения (11) и (16), имеем:

$$\frac{I_m(R_0 + R_{\text{ш}}) + a_1}{I_C R_{\text{ш}}} = e^{\lambda_1(t_m - t_C)} = e^{\lambda_2(t_m - t_C)}, \quad (17)$$

что соответствует

$$t_m = t_C, \quad I_m = I_C \frac{R_{\text{ш}}}{R_0 + R_{\text{ш}}} - \frac{a_1}{R_0 + R_{\text{ш}}}. \quad (18)$$

Как следует из (18), одновременность достижения токами своих максимумов возможна благодаря исключительно активному характеру нагрузки в цепи в рассмотренном частотном диапазоне, что соответствует экспериментальным данным [4, 7].

В некоторых случаях зависимость нагрузки от тока описывают гиперболой второго порядка:

$$R_H = a_0 + \frac{a_2}{i_H^2}; \quad R_0 = a_0, \quad R_* = \frac{a_2}{i_H^2}. \quad (19)$$

В этом случае уравнение, описывающее переходной процесс в цепи рис. 1 преобразуется к виду:

$$\frac{d^2 i_H}{dt^2} + \frac{R_0 R_{\text{ш}}}{L(R_0 + R_{\text{ш}})} \frac{di_H}{dt} + \omega_0^2 i_H + \frac{1}{R_0 + R_{\text{ш}}} \left[\frac{-a_2}{i_H^2} \cdot \frac{d^2 i_H}{dt^2} + \frac{2a_2}{i_H^3} \left(\frac{di_H}{dt} \right)^2 - \right. \\ \left. - \frac{R_{\text{ш}} a_2}{L i_H^2} \cdot \frac{di_H}{dt} + \omega_0^2 \frac{a_2}{i_H} \right] = 0; \quad (20)$$

или

$$\frac{d^2 i_H}{dt^2} + \frac{R_0 R_{\text{ш}}}{L(R_0 + R_{\text{ш}})} \frac{di_H}{dt} + \omega_0^2 i_H - \frac{1}{R_0 + R_{\text{ш}}} \cdot \frac{a_2}{i_H^2} \left\{ \frac{d^2 i_H}{dt^2} - \frac{2}{i_H} \left(\frac{di_H}{dt} \right)^2 + \frac{R_{\text{ш}}}{L} \cdot \frac{di_H}{dt} - \omega_0^2 i_H \right\} = 0, \quad (21)$$

Нелинейная часть, присутствующая в уравнениях (20), (21), не позволяет решить его путем прямого дифференцирования и требует применения специальных методов анализа, например, метода малого параметра [9]. Для этого представим i_H в виде асимптотического ряда по малому параметру

$$i_H = i_0 + \varepsilon i_1 + \varepsilon^2 i_2 + \dots \quad (22)$$

В нашем случае есть возможность нескольких вариантов выделения малого параметра:

1) искусственное введение малого параметра $\varepsilon = 1$;

$$2) \varepsilon = \frac{R_{\text{ш}}}{R_0 + R_{\text{ш}}} < 1;$$

$$3) \varepsilon = \frac{R_{\text{ш}}}{R_0 + R_{\text{ш}}} \cdot \frac{a_2}{I_m^2}.$$

В последнем случае применено нормирование коэффициента a_2 относительно максимального значения тока в нагрузке для того, чтобы малый параметр был безразмерным. Заметим, что при этом все слагаемые уравнения (21) должны быть домножены на I_m^2 .

Для рассматриваемого случая все три варианта задания ε одинаковы. Отличие будет состоять лишь в том, что в окончательном уравнении для тока в нагрузке вместо ε будет подставлена соответствующая величина.

В рассмотрении будем использовать только два первых члена уравнения (22) и применим вариант искусственного введения ε . Уравнение для ε^0 примет вид:

$$\frac{d^2 i_0}{dt^2} + \frac{R_0 R_{\text{ш}}}{L(R_0 + R_{\text{ш}})} \frac{di_0}{dt} + \omega_0^2 i_0 = 0. \quad (23)$$

Решением (23) в соответствии с [8] будет

$$i_0 = C_{10} e^{\lambda_1 t} + C_{20} e^{\lambda_2 t}, \quad (24)$$

а корни характеристического уравнения определяются по (9).

Поскольку начальные условия для данного случая являются некорректными (табл. 1), то для вычисления постоянных интегрирования

применим условия (1). При этом ненулевые условия будем учитывать только при порождающем решении.

Таким образом, постоянные интегрирования примут вид:

$$C_{10} = \frac{I_m \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t_m}; \quad C_{20} = -\frac{I_m \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_2 t_m}. \quad (25)$$

Для первого приближения можем записать:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{R_0 R_{\text{ш}}}{L(R_0 + R_{\text{ш}})} \cdot \frac{di_1}{dt} + \omega_0^2 i_1 = \\ = \frac{a_2}{(R_0 + R_{\text{ш}}) i_0^2} \left\{ \frac{d^2 i_0}{dt^2} - \frac{2}{i_0} \cdot \left(\frac{di_0}{dt} \right)^2 + \frac{R_{\text{ш}}}{L} \cdot \frac{di_0}{dt} - \omega_0^2 i_0 \right\} = F(t), \end{aligned} \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} F(t) = F_* \left\{ C_{10}^2 e^{2\lambda_1 t} \left(\lambda_1^2 + \frac{R_{\text{ш}}}{L} \lambda_1 - \omega_0^2 \right) + C_{20}^2 e^{2\lambda_2 t} \left(\lambda_2^2 + \frac{R_{\text{ш}}}{L} \lambda_2 - \omega_0^2 \right) + \right. \\ \left. + C_{10} C_{20} e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t} \left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \frac{R_{\text{ш}}}{L} (\lambda_1 + \lambda_2) - 2\omega_0^2 \right) - 2C_{10} \lambda_1 e^{\lambda_1 t} - 2C_{20} \lambda_2 e^{\lambda_2 t} \right\}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$F_* = \frac{a_2}{(R_0 + R_{\text{ш}}) \left(C_{10} e^{\lambda_1 t} + C_{20} e^{\lambda_2 t} \right)^3}.$$

Решение уравнения будет иметь вид

$$i_1 = C_{11} e^{\lambda_1 t} + C_{21} e^{\lambda_2 t} + i_{1ч}, \quad (28)$$

где $i_{1ч}$ – частное решение уравнения (26).

Заметим, что частное решение будет включать все степени экспоненты, присутствующие в соотношении (27). Однако из-за громоздкости оно тут не приводится.

Выводы:

1. При определении постоянных интегрирования в решении дифференциального уравнения, описывающего переходные процессы в цепи разряда конденсатора на искроэрозионную нагрузку предпочтительнее использовать специальные условия, соответствующие моменту достижения током нагрузки своего максимального значения. Это условие применимо для всех рассмотренных функций, аппроксимирующих зависимость сопротивления нагрузки от тока в ней. В то же время использование начальных и краевых условий для большинства из вышеуказанных функций не представляется возможным.

2. Наиболее удобной для использования в аналитических расчетах является аппроксимация зависимости сопротивления нагрузки от

тока в ней суммой постоянной составляющей и гиперболы первой степени. Такая зависимость позволяет точно решить дифференциальное уравнение, описывающее переходные процессы в рассмотренной цепи не зависимо от расположения датчика тока, как в цепи нагрузки, так и в цепи конденсатора.

Список литературы: 1. Монастырский Г.Е., Коваль Ю.Н., Шпак А.П., Мусиенко Р.Я., Коломыцев В.И., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яковенко П.Г. Получение электроискровым методом порошков сплавов с эффектом памяти формы // Порошковая металлургия. – 2007. – № 5-6. – С. 3-15. 2. Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфицирующее действие объёмного электроискрового разряда в воде // Химия и технология воды. – 1999, № 3. – Т. 21. – С. 328-336. 3. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Шевченко Н.И., Ломко Н.А. Разрядно-импульсные системы производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объёмного электроискрового диспергирования // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2010. – № 26. – С. 152-160. 4. Захарченко С.Н. Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 17-27. 5. Щерба А.А., Захарченко С.М., Супруновська Н.І., Шевченко Н.І., Монастирський Г.Є., Перетятко Ю.В., Петрученко О.В. Стабілізація режимів електротехнологічних систем для отримання іскроерозійних мікро- та нанопорошків // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск Силова електроніка та енергоефективність. – 2006. – Ч. 1. – С. 120-123. 6. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983. – 431 с. 7. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Захарченко С.Н. Регулирование динамических параметров технологических систем объёмной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка'2001. – Київ: Вид. Ін-ту електродинаміки НАНУ, – 2001. – С. 3-16. 8. Смирнов В.И. Курс высшей математики, Т. 2. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1953. – 628 с. 9. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Наука, 1974. – 504 с.

Поступила в редколлегию 06.11.2012

М.М. РЕЗИНКИНА, д-р техн. наук, гл.н.с., Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков
В.С. ГРИНЧЕНКО, м.н.с., Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКОПРОВОДА ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ПЛАСТИН

Описаны экспериментальные исследования экранирующих свойств системы двух электропроводных пластин в зависимости от их расположения относительно трехфазного токопровода, являющегося источником первичного магнитного поля. Показано, что наибольшая эффективность экранирования магнитного поля токопроводов достигается, если одна из пластин расположена над токопроводами, а другая – на определенном расстоянии между токопроводами и защищаемой областью.

Ключевые слова: электромагнитный экран, эффективность экранирования, трехфазная линия, промышленная частота.

Описані експериментальні дослідження екрануючих властивостей системи двох електропровідних пластин залежно від їх розташування відносно трифазного струмопровода, яке є джерелом первинного магнітного поля. Показано, що найбільша ефективність екранування магнітного поля струмопроводів досягається, якщо одна з пластин розташована над струмопроводами, а інша – на певній відстані між струмопроводами та областю, що захищається.

Ключові слова: електромагнітний екран, ефективність екранування, трифазна лінія, промислова частота.

The experimental research of two conductive plates screening properties depending on their location in relation to three-phase bus-bar (which is a source of primary magnetic field) has been described. It has been shown that three-phase bus-bar magnetic field screening factor is the biggest if one of the plates is located above the bus-bars, and the other one is located on the definite distance between bus-bars and protected region.

Keywords: electromagnetic shield, screening factor, three-phase line, power frequency.

Введение. Магнитное поле (МП) промышленной частоты (ПЧ) является техногенным фактором окружающей среды и, как свидетельствуют медико-статистические исследования, может оказывать негативное

влияние на здоровье людей. В связи с этим в большинстве стран мира вводятся все более жесткие санитарные нормативы по предельно допустимому уровню магнитной индукции низкочастотного поля.

Одним из распространенных источников МП ПЧ являются трехфазные линии электропередачи (ЛЭП): традиционные воздушные ЛЭП и подземные кабельные линии, уже получившие широкое распространение за рубежом и являющиеся перспективным средством передачи электрической энергии в жилых зонах Украины. Эффективным методом снижения переменного МП кабельных линий электропередачи является электромагнитное экранирование. Поэтому актуальной является задача поиска конфигураций электромагнитных экранов, обеспечивающих требуемую эффективность экранирования при меньшем объеме металла, необходимого для их изготовления. Так как аналитическое описание процесса электромагнитного экранирования трехфазной линии затруднительно, то данную задачу решают при помощи численного моделирования [1-3] либо экспериментально [4-8]. В литературе рассмотрено снижение МП трехфазных токопроводов при помощи плоских экранов, представляющими собой электропроводные пластины [1, 2, 5-8], U -образных [1-4] и экранов замкнутой конфигурации [1, 2, 5]. В [3] путем численного моделирования было показано, что применение электромагнитных экранов, состоящих из двух U -образных элементов, позволяет на 15-20 % увеличить эффективность экранирования МП трехфазного токопровода по сравнению с однослойным U -образными экранами эквивалентного объема. В свою очередь, электромагнитные экраны, состоящие из двух электропроводных пластин, не рассматривались.

Целью работы является экспериментальное исследование возможности повышения эффективности экранирования МП трехфазной линии системой двух электропроводных пластин путем размещения одной из них над источником МП и выбора оптимального расположения второй пластины.

Постановка эксперимента. Измерения проводились на магнитоизмерительном стенде НТЦ МТО НАН Украины. Физическая модель трехфазной линии электропередачи (обозначена "4" на рис. 1) состояла из трех токопроводов длиной 14,5 м каждый, размещенных в горизонтальной плоскости параллельно земле. Конструкция макета трехфазной линии позволяла варьировать расстояние δ между соседними токопроводами от 10 см до 30 см. Через токопроводы протекал электрический ток частотой 50 Гц. Действующее значение силы тока было равно 21 А. В токопроводах с координатами $x=\delta$, $x=0$ и $x=-\delta$ фаза тока

составляла, соответственно, -120° , 0° и $+120^\circ$ (рис. 1). Измерение тока проводилось при помощи токоизмерительных клещей типа Ц4505М, зав. № 3984, класс точности 4.0.

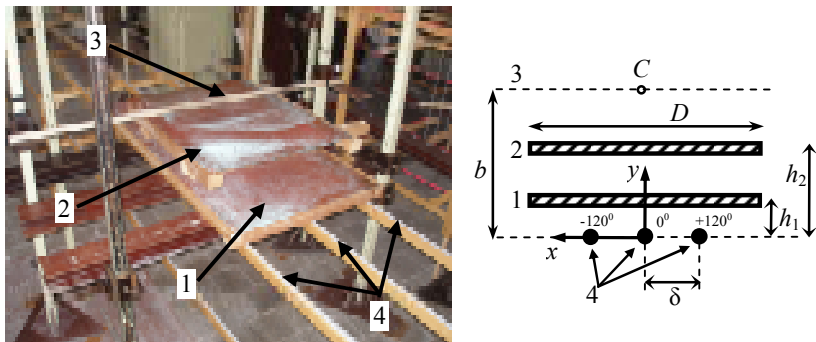


Рис. 1 – Экспериментальная установка

Электромагнитный экран представлял собой систему двух медных пластин прямоугольной формы (обозначены "1" и "2" на рис. 1). Толщина каждой из пластин – 1 мм, ширина $D=72$ см. Чтобы не ограничивать общность рассматриваемой задачи, длины пластин были выбраны различными: 140 см (пластина № 1) и 85 см (пластина № 2). Расположение пластин относительно токопроводов показано на рис. 1: пластина № 1 и пластина № 2 устанавливались, соответственно, на высоте h_1 и h_2 над токопроводами.

Датчик магнитометра размещался в точках оси измерений, обозначающей положение области экранирования. Ось измерений (обозначена "3" на рис. 1) располагалась на высоте b параллельно токопроводам в плоскости, проходящей через середины пластин.

Измерение компонент магнитной индукции B_x и B_y поля ПЧ проводилось магнитометром типа EMF-827. На рис. 1 показана ориентация осей введенной системы координат: ось X лежала в горизонтальной плоскости и была направлена перпендикулярно токопроводам, ось Y была перпендикулярна плоскости расположения трехфазного токопровода. Действующее значение магнитной индукции B вычислялось по измеренным действующим значениям ее проекций B_x и B_y :

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad [9].$$

При проведении эксперимента для каждого из наборов значений $\{\delta, h_1, h_2, b\}$ находилось распределение действующего значения магни-

тной индукции вдоль оси измерений и определялась ее максимальная величина.

Результаты эксперимента. Были проведены две серии измерений: в одном случае расстояние между фазами δ было намного меньше ширины пластин D , в другом значения δ и D были сравнимы.

В первом случае параметры системы "трехфазная линия – электромагнитный экран" были следующими: $\delta=10$ см, $h_1=10$ см, высота h_2 пластины № 2 варьировалась от 10 см до 35 см, высота b расположения оси наблюдения принимала значения 40 см, 50 см и 60 см. В результате измерений была получена представленная на рис. 2 зависимость максимального действующего значения магнитной индукции от высоты размещения пластины № 2 для различных высот расположения оси наблюдения.

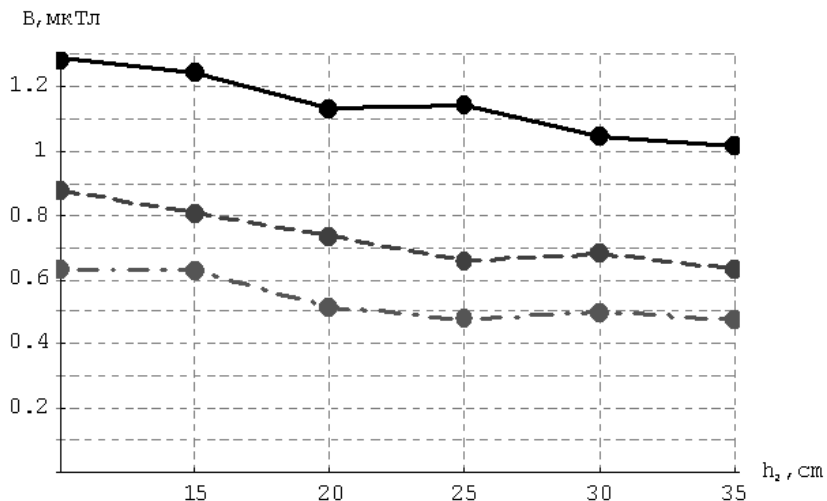


Рис. 2 – Зависимость максимального действующего значения магнитной индукции от высоты размещения пластины № 2 для различных высот расположения оси наблюдения.

На рис. 2 сплошная кривая соответствует расположению оси наблюдения на высоте $b=40$ см над трехфазной линией, пунктирная кривая – расположению оси наблюдения на высоте $b=50$ см, точка-тире кривая – на высоте $b=60$ см. Как видно из представленного графика, зависимости $B(h_2)$ монотонно убывают. Это обусловлено тем, что в случае $\delta \ll D$ действующее значение магнитной индукции B на оси измерений достигает максимума в точке C , находящейся над центром

экрана (рис. 1). Поэтому приближение верхней пластины к экранируемой области приводит к снижению магнитной индукции и вместе с тем к увеличению эффективности экранирования.

Во второй серии измерений параметры системы были положены следующими: межфазное расстояние $\delta=30$ см, $h_1=6,5$ см, высота h_2 пластины № 2 варьировалась от 13,5 см до 24 см, высота расположения оси измерений составляла $b=29$ см. В этом случае отличие между расстоянием между крайними токопроводами и шириной экрана невелико: $2\delta \approx D$. На рис. 3 представлен график зависимости максимальной магнитной индукции на оси измерений от высоты расположения пластины № 2.

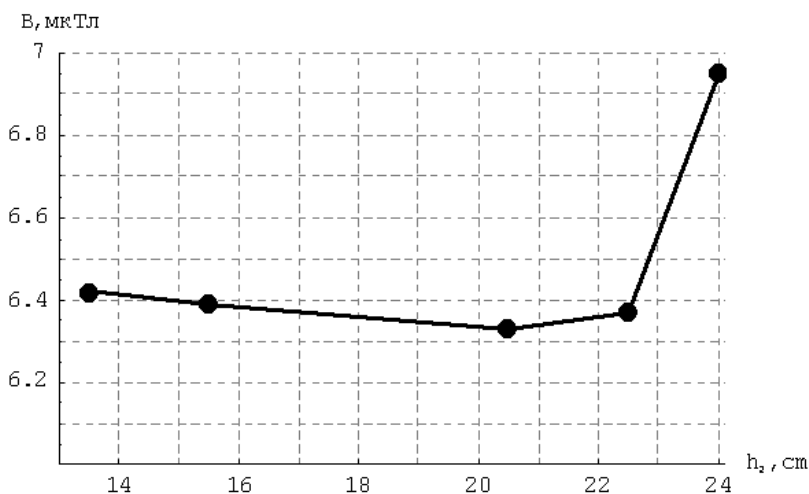


Рис. 3 – График зависимости максимальной магнитной индукции на оси измерений от высоты расположения пластины № 2.

Как видно из представленной зависимости, при приближении пластины № 2 к области экранирования величина магнитной индукции сначала незначительно спадает, достигает минимума в окрестности $h_2 = h_2^* = 20$ см и далее увеличивается. Причем при $h_2 < h_2^*$ магнитная индукция на оси наблюдения максимальна в точке C , находящейся над центром экрана, а при $h_2 > h_2^*$ – в точках областей, которые находятся над краями экрана. В свою очередь, при $h_2 \approx h_2^*$ магнитная индукция в точке C и в областях, которые находятся над краями экрана, снижена

примерно до одного значения.

Качественно этот эффект можно объяснить следующим образом: нижняя пластина находится возле трехфазной линии, тем самым реализуя подход "экранирование источника" [2]; верхняя пластина расположена ближе к той части экранируемого пространства, где уровень МП трехфазной линии изначально выше, и обеспечивает в этой области большее его снижение, тем самым реализуя подход "экранирование защищаемой области".

Выводы. В результате экспериментальных исследований было показано: если межфазное расстояние намного меньше ширины экрана, то приближение верхнего элемента к экранируемой области увеличивает эффективность экранирования. В свою очередь, если удвоенное межфазное расстояние ненамного меньше ширины экрана, то существует оптимальное расположение верхней пластины, при котором достигается наибольшая эффективность экранирования, и дальнейшее ее приближение к защищаемой области ухудшает экранирующие свойства системы двух электропроводных пластин. Полученный результат подтверждает возможность повышения эффективности экранирования экраном, состоящим из двух электропроводных элементов, за счет оптимизации их расположения без увеличения суммарного объема этих элементов.

Список литературы: 1. *Zucca M.* Magnetic field mitigation above a double trefoil HV underground power line / *M. Zucca, P. Ribaldone* // 18th International Conference on Electricity Distribution, 6-9 June 2005. – Turin, 2005. – Paper 91. 2. *del Pino López J.C.* Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables / *J.C. del Pino López, P. Cruz Romero, P. Dular* // International conference on renewable energies and power quality, 28-30 Mach, 2007. – Sevilla, 2007. – Paper 326. 3. *Резинкина М.М.* Снижение уровня магнитного поля подземных токопроводов электромагнитными экранами, состоящими из U-образных элементов / *М.М. Резинкина, В.С. Гринченко* // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 49. – С. 73-78. 4. *Bourdages M.* Assessment of magnetic field mitigation methods for distribution networks / *M. Bourdages, A. Turgeon* // 19th International Conference on Electricity Distribution, 21-24 May 2007. – Vienna, 2007. – Paper 0480. 5. *De Wulf M.* Electromagnetic shielding of high-voltage cables / *M. De Wulf, P. Wouters, P. Sergeant, L. Dupré, E. Hoferlin, S. Jacobs, P. Harlet* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – № 316. – P. 908-911. 6. *Salinas E.* Conductive and ferromagnetic screening of 50 Hz magnetic fields from a three-phase system of busbars / *E. Salinas* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2001. – V. 226-230. – P. 1239-1241. 7. *Beltran H.* Optimal screen width for field reduction applications of low frequency magnetic fields in three-phase conductors / *H. Beltran, V. Fuster, C. Garcia, V. Ferrer, I. Piqueras* // 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica. – Marbella,

Málaga, 2005. – Paper 236. **8.** *D'Amore M.* Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines / *M. D'Amore, E. Menghi, M.S. Sarto* // 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 18-22 Aug. – Istanbul, 2003. – V. 1. – P. 203-208. **9.** *Белицын И.В.* Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. Метод их расчета и нормирования / *И.В. Белицын, Т.В. Котырло, А.В. Макаров* // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 4. – С. 61-65.

Поступила в редколлегию 19.11.2012

Ю.В. БАТЫГИН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, ХНАДУ,
Харьков

А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, доц., докторант, ХНАДУ,
Харьков

Е.А. ЧАПЛЫГИН, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков

И.С. ТРУНОВА, аспирант, ХНАДУ, Харьков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА
ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ
В СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА**

Статья посвящена определению зависимости коэффициента передачи энергии из первичной во вторичную обмотку согласующих устройств – импульсных трансформаторов тока цилиндрического типа, от значения индуктивной нагрузки. В ходе исследований проведено осциллографирование разрядных импульсов и экспериментально определен коэффициент передачи энергии в зависимости от индуктивности индукторной системы – нагрузки согласующего устройства.

Ключевые слова: импульсный трансформатор, индуктивная нагрузка, коэффициент передачи энергии, индукторная система, согласующие устройства.

Стаття присвячена визначенню залежності коефіцієнта передачі енергії з первинної у вторинну обмотку погоджувальних пристроїв – імпульсних трансформаторів струму циліндричного типу, від значення індуктивного навантаження. У ході досліджень проведено осцилографування розрядних імпульсів і експериментально визначений коефіцієнт передачі енергії залежно від індуктивності індукторної системи – навантаження пристрою, що погодить.

Ключові слова: імпульсний трансформатор, індуктивне навантаження, коефіцієнт передачі енергії, індукторна система, що погодить пристрої.

The paper is dedicated to energy-transfer coefficient (from primary to secondary) dependence determination on inductive load value in matching devices – cylindrical type pulse current transformers. The discharge pulse oscillograms have been measured and energy-transfer coefficient in the dependence on inductance of inductor system – matching device load has been experimentally determined.

Keywords: pulse transformer, inductive load, energy-transfer coefficient, inductor system, matching devices.

Введение. Согласующее устройство представляет собой повышающий импульсный трансформатор тока, назначение которого состоит

в увеличении амплитуды сигнала и в варьировании временных параметров каждого из импульсов.

По сути, согласующее устройство необходимо для согласования источника мощности – магнитно-импульсной установки с инструментом обработки – индукторной системой, что приводит к повышению эффективности выполнения заданной технологической операции.

Анализ основных достижений и публикаций. Согласующие устройства можно классифицировать по конструктивному исполнению на дисковые плоские, цилиндрические коаксиальные и др. (специальные конструкции) [1, 2]. Так в [3, 4] описываются конструктивные особенности плоских дисковых импульсных трансформаторов тока. Причем, в [4] приводится анализ существующих конструкций импульсных трансформаторов, предназначенных для получения больших токов – порядка единиц и десятков мегампер. В [5-8] рассмотрены конструктивные особенности специальных импульсных трансформаторов тока. В [9] описывается индуктор, состоящий из нескольких электрически изолированных секций, каждая из которых соединена со своим трансформатором тока. Авторы работы [10] рассматривают вопросы проектирования и исследования электрической эффективности одновитковых индукторов, на основании чего делают однозначный вывод, что наиболее перспективными являются одновитковые индукторы в сочетании с импульсным трансформатором.

Авторским коллективом лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ) разработан целый ряд согласующих устройств, использование которых позволило выполнять ранее трудно реализуемые, а порой и невозможные, технологические операции по восстановлению (удалению вмятин, прогибов, деформаций) поверхности тонкостенных листовых металлов [1, 11-13]. Это открывает совершенно новые возможности в обрабатывающей промышленности, т.к. операции по реставрации могут быть выполнены бесконтактно и без разборки корпусных элементов восстанавливаемых конструкций.

Цель работы: экспериментальное исследование зависимости коэффициента передачи энергии из первичной во вторичную обмотку согласующих устройств – импульсных трансформаторов тока цилиндрического типа, от значения индуктивной нагрузки, разработанных в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ.

Условия эксперимента и эксперимент. Экспериментальные исследования проводились на комплексе для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов,

разработанного в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ [1] (рис. 1).

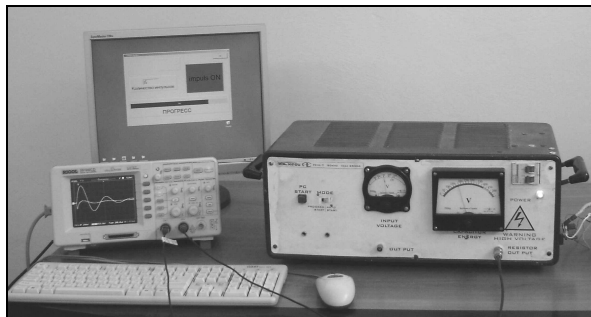


Рис. 1 – Комплекс для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов.

Комплекс работает в серийном режиме генерирования разрядных импульсов, при следующих параметрах:

- напряжение питающей сети $\sim U_c=220$ В;
- максимальное напряжение заряда емкостных накопителей $U_3=650$ В;
- емкость конденсаторов комплекса $C=33$ мкФ;
- частота следования разрядных импульсов $f_{\text{имп.}}=20$ Гц;
- собственная частота разрядного импульса 30 кГц;
- амплитудное значение тока в импульсе 3000 А;
- форма сигнала – аperiodически затухающая синусоида

Осциллограммы сигналов в разрядной цепи комплекса были получены с помощью цифрового осциллографа PV6501 через включенный в разрядную цепь шунт с сопротивлением $R_{\text{ш}}=12,5 \cdot 10^{-3}$ Ом, а также с помощью индукционного датчика – пояса Роговского.

При исследовании зависимости коэффициента передачи энергии от индуктивной нагрузки в согласующих устройствах цилиндрического типа было проведено следующие опыты:

1. Определение параметров комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов и исследуемых индукторов:
 - 1.1. Осциллографирование разрядного импульса комплекса при его работе на закороченный выход.
 - 1.2. Осциллографирование разрядных импульсов при подключении комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов раз-

личной индуктивной нагрузки (рис. 2):

- 1.2.1. Осциллографирование сигналов с нагрузкой в виде конического индуктора (рис. 2, а).
- 1.2.2. Осциллографирование сигналов с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=3,5$ (рис. 2, б).
- 1.2.3. Осциллографирование сигналов с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=1,5$ (рис. 2, в).
- 1.2.4. Осциллографирование сигналов с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=1$ (рис. 2, г).
- 1.2.5. Осциллографирование сигналов с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=0,5$ (рис. 2, д).

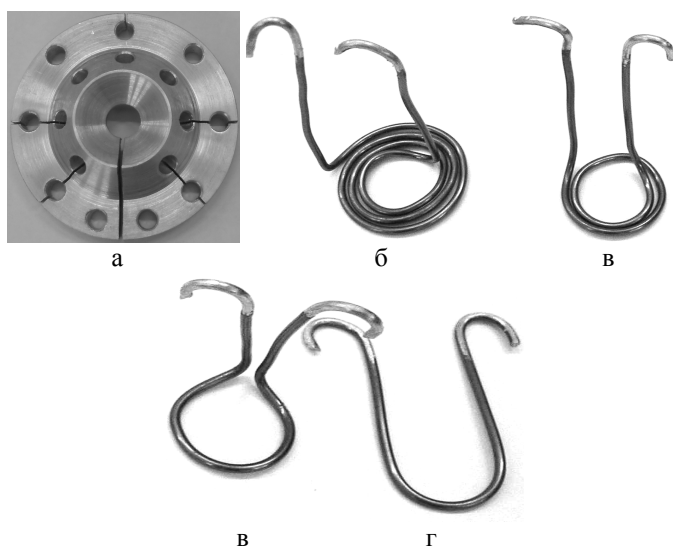


Рис. 2 – Исследуемые индукторы: а – конический; б – плоская медная спираль с количеством витков $w=3,5$; в – плоская медная спираль с количеством витков $w=1,5$; г – плоская медная спираль с количеством витков $w=1$; д – плоская медная спираль с количеством витков $w=0,5$.

2. Исследование параметров цилиндрического согласующего устройства с одним разомкнутым вторичным витком. Внешний вид исследуемого согласующего устройства – импульсного трансформатора тока с подключенным к нему коническим индуктором представлен на рис. 3.

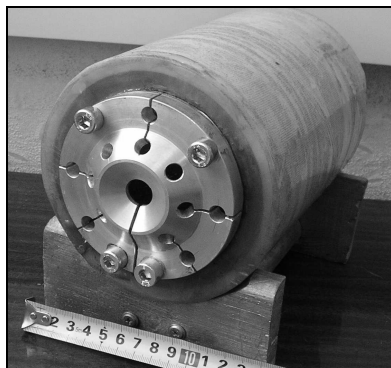


Рис. 3 – Внешний вид импульсного трансформатора тока с подключенным к нему коническим индуктором.

- 2.1. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *конический индуктор*.
- 2.2. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *индуктор в виде плоской спирали с количеством витков $w=3,5$* .
- 2.3. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *индуктор в виде плоской спирали с количеством витков $w=1,5$* .
- 2.4. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *индуктор в виде плоской спирали с количеством витков $w=1$* .
- 2.5. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *индуктор в виде плоской спирали с количеством витков $w=0,5$* .

Посредством шунта, подключенного в разрядную цепь комплекса, получены осциллограммы разрядного импульса в *первичной обмотке* согласующего устройства. С помощью индукционного датчика – пояса Роговского получены осциллограммы разрядных импульсов в *первичной и вторичной обмотке* согласующих устройств.

3. Исследование параметров цилиндрического согласующего устройства с двумя вторичными коаксиально расположенными витками. Внешний вид исследуемого согласующего устройства – импульсного трансформатора тока с подключенным к нему коническим индуктором представлен на рис. 4.



Рис. 4 – Внешний вид исследуемого согласующего устройства.

По пункту 3 были проведены исследования, идентичные пункту 2.

В соответствии с перечнем экспериментальных исследований были получены осциллограммы. На рис. 5 представлена осциллограмма разрядного сигнала комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов (выход закорочен, сигнал измерен с шунта, делитель 1×10). На рис. 6 представлены осциллограммы разрядных сигналов комплекса, нагрузка – медный многовитковый индуктор (количество витков w , сигнал измерен с шунта, делитель 1×10).

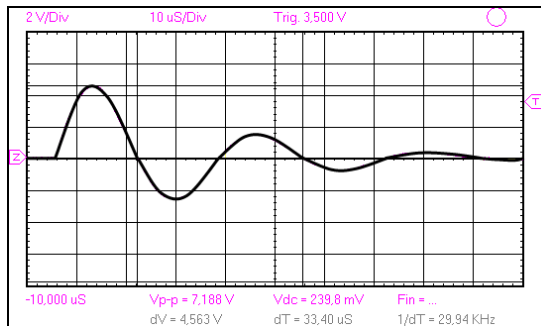


Рис. 5 – Осциллограмма разрядного сигнала комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов.

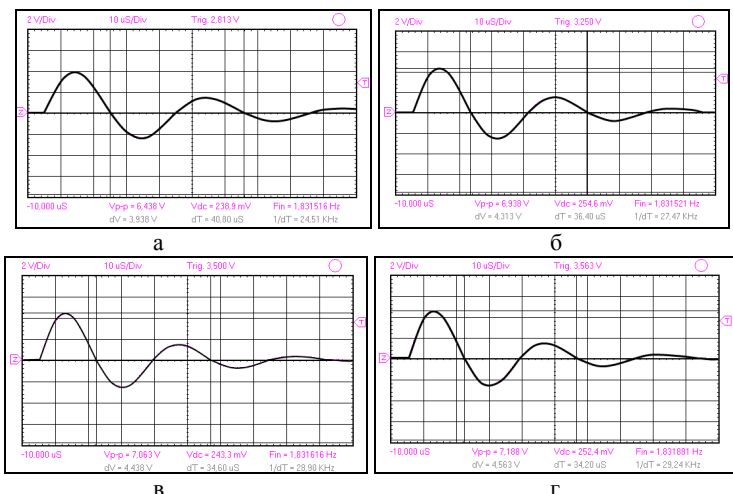


Рис. 6. Осциллограммы разрядных сигналов комплекса, нагрузка – медный многovitковый индуктор (количество витков w , сигнал измерен с шунта, делитель 1×10): а – $w=3,5$; б – $w=1,5$; в – $w=1$; г – $w=0,5$

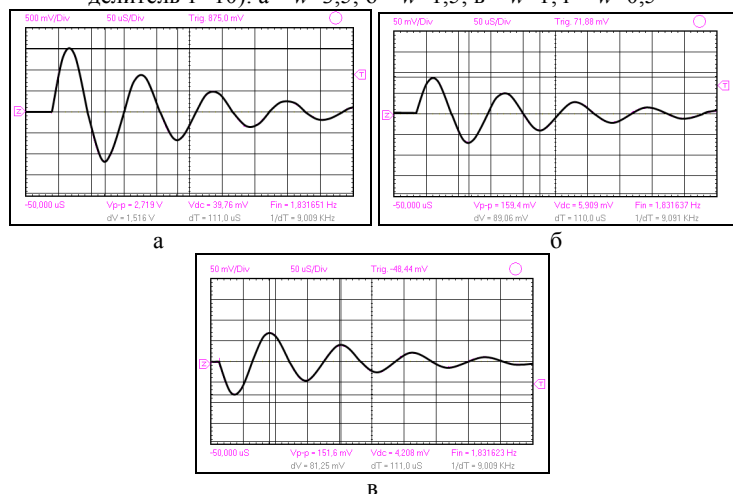


Рис. 7 – Осциллограммы разрядных сигналов при подключенном цилиндрическом согласующем устройстве с индуктором в виде плоской спирали, $w=3,5$: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи (делитель 1×10); б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи (делитель 1×1); в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи (делитель 1×1).

Для сравнительного примера приведем осциллограммы, полученные в ходе проведения экспериментов по пунктам 2 и 3. Осциллограммы разрядных сигналов при подключенном цилиндрическом согласующем устройстве с индуктором в виде плоской спирали, $w=3,5$ (рис. 7) и осциллограммы разрядных сигналов при подключенном цилиндрическом согласующем устройстве с двумя вторичными коаксиально расположенными витками и индуктором в виде плоской спирали, $w=3,5$ (рис. 8).

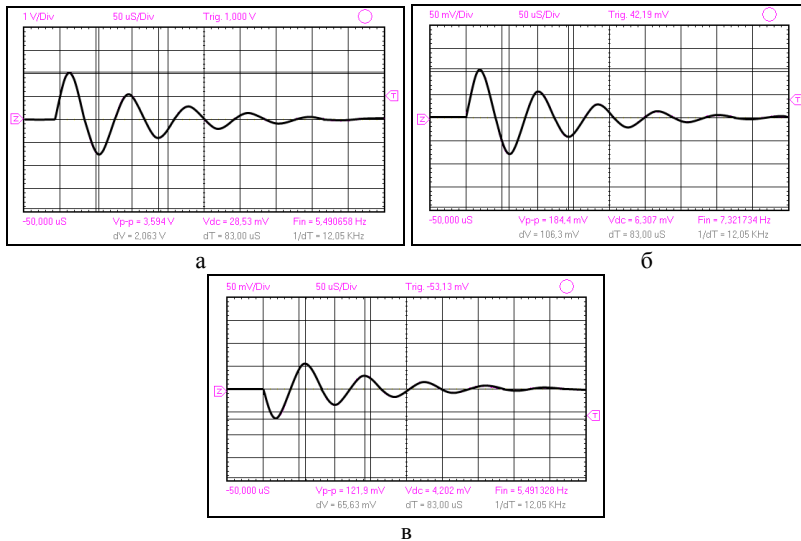


Рис. 8. Осциллограммы разрядных сигналов при подключенном цилиндрическом согласующем устройстве с двумя вторичными коаксиально расположенными витками и индуктором в виде плоской спирали, $w=3,5$: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи (делитель 1×10); б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи (делитель 1×10); в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи (делитель 1×10).

Обработка экспериментальных данных. Индуктивность L вычисляется по измеренным осциллограммам по формуле:

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота разрядного импульса, рад/с; C – емкость накопителя энергии, Ф.

Результаты обработки измеренных осциллограмм сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты обработки измеренных осциллограмм.

Объект исследования	f , Гц	ω , рад/с	$L_{общая}$, нГн	$L_{инд.}$, нГн
Закороченный вывод	29940	188023,2	857	-
Медный многовитковый индуктор $w=3,5$	24270	153922,8	1279	422
Медный многовитковый индуктор $w=1,5$	27170	172511,6	1018	161
Медный многовитковый индуктор $w=1$	28900	181492	920	63
Медный многовитковый индуктор $w=0,5$	2924	183627,2	898	42
Конический индуктор	-	-	-	30

Индуктивность цилиндрического индуктора, рабочая область которого в сечении имеет форму усеченного конуса (конический индуктор), была измерена в предыдущих экспериментах [14].

Коэффициент передачи энергии, из первичной обмотки во вторичную (коэффициент трансформации по току), цилиндрического согласующего устройства с одним разомкнутым вторичным витком, определяется отношением амплитудного значения сигнала во вторичной обмотке к амплитудному значению сигнала в первичной обмотке.

– Конический индуктор – $K_{тр} \approx 6,4$.

– Индуктор в виде плоской спирали, $w=3,5$ – $K_{тр} \approx 0,9$.

– Индуктор в виде плоской спирали, $w=1,5$ – $K_{тр} \approx 1,7$.

– Индуктор в виде плоской спирали, $w=1$ – $K_{тр} \approx 3,1$.

– Индуктор в виде плоской спирали, $w=0,5$ – $K_{тр} \approx 3,5$.

Коэффициент передачи энергии, из первичной обмотки во вторичную (коэффициент трансформации по току), цилиндрического согласующего устройства с двумя вторичными коаксиально расположенными витками, определяется отношением амплитудного значения сигнала во вторичной обмотке к амплитудному значению сигнала в первичной обмотке.

– Конический индуктор – $K_{тр} \approx 4,7$.

– Индуктор в виде плоской спирали, $w=3,5$ – $K_{тр} \approx 0,6$.

– Индуктор в виде плоской спирали, $w=1,5$ – $K_{тр} \approx 1,25$.

– Индуктор в виде плоской спирали, $w=1$ – $K_{тр} \approx 2,5$.

– Индуктор в виде плоской спирали, $w=0,5$ – $K_{тр} \approx 2,9$.

Сравнение результатов обработки экспериментальных данных.
Сравнительный анализ обработки экспериментальных исследований

цилиндрических согласующих устройств с различной индуктивной нагрузкой представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Анализ обработки экспериментальных исследований.

№ п/п	Исследуемый индуктор	L инд., нГн	$K_{тр}$	
			Согл. уст- ройство 1 втор. вит- ток	Согл. уст- ройство 2 втор. вит- ка
1	Конический индуктор	30	6,4	4,7
2	Индуктор в виде плоской спирали, $w=0,5$	42	3,5	2,9
3	Индуктор в виде плоской спирали, $w=1$	63	3,1	2,5
4	Индуктор в виде плоской спирали, $w=1,5$	161	1,7	1,25
5	Индуктор в виде плоской спирали, $w=3,5$	422	0,9	0,6

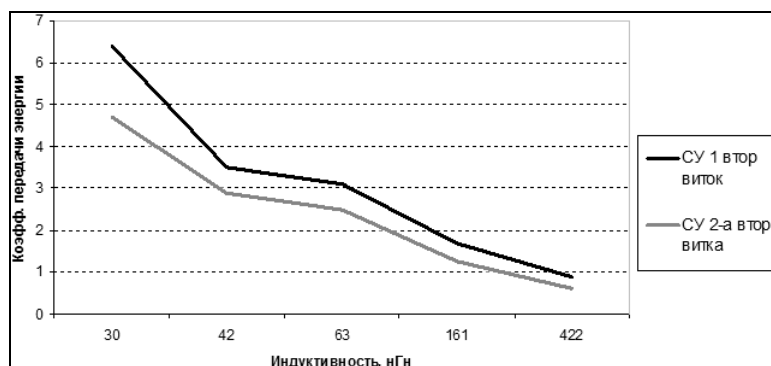


Рис. 9 – График изменения коэффициента передачи энергии.

По значениям основных характеристик исследуемых устройств построен график изменения коэффициента передачи энергии в исследуемых согласующих устройствах в зависимости от индуктивности индуктора (рис. 9).

Выводы. Проведенные экспериментальные исследование с последующей их обработкой позволяет сделать следующие выводы.

1. В ходе проведения экспериментальных исследований были определены индуктивности индукторов, которые являлись нагрузкой для исследуемых согласующих устройств.

2. Проведенные исследования показали, что коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную у исследуемых согла-

сующих устройств зависит от значения индуктивности нагрузки (индукторных систем подключаемых к согласующим устройствам).

3. Данный тип согласующих устройств способен эффективно работать с индукторными системами, с низким значением индуктивности ≤ 50 нГн. Увеличение индуктивности индукторов больше 50 нГн, приведет к значительному снижению коэффициента передачи энергии из первичной обмотки во вторичную.

Список литературы: 1. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Т. 3, – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с. 2. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / [авт. сот. И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко]. – Харьков: Вища школа, 1977. – 190с. 3. Vorrichtung zur Formung von Werkstücken durch Anwendung magnetischer Impulse / Gulf General Atomic Incorp., San Diego, California (США); Авт. изобрет. F.D. Broton, G.B. Hayward. – Заявл. 29.11.63. – № Р 1464646.9-14 (G 39271); Оpubл. 19.05.71; Приор. 30.11.62. – № 3231842, США; МКИ В 21 D 26/14, Н 01 F (7с 26/14, 21 D 2/49, 21 G 1/02). 4. Импульсный согласующий трансформатор / Г.М. Гончаренко, В.А. Галкин, Ю.И. Гужавин, Ю.А. Попов, И.А. Галкин. – В кн.: Высоковольтная импульсная техника. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 1976. – Вып.3. – С. 27-34. 5. А.с. 792298 (СССР). Импульсный трансформатор / Харк. политехню ин-т им. В.И. Ленина. Авт. изобрет. Л.Т. Хименко. – Заявл. 24.04.78. – № 2607647/24-07; Оpubл. в Б.И., 1980. – № 48; МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. 6. А.с. 675456 (СССР). Импульсный трансформатор / Харк. политехню ин-т им. В.И. Ленина. Авт. изобрет. Л.Т. Хименко. – Заявл. 03.05.77. – № 2482198/27-07; Оpubл. в Б.И., 1979. – № 27; МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. 7. А.с. 756496 (СССР). Импульсный трансформатор / Харк. политехню ин-т им. В.И. Ленина. Авт. изобрет. Л.Т. Хименко. – Заявл. 27.01.78. – № 2574788/24-07; Оpubл. в Б.И., 1980. – № 30; МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. 8. А.с. 548341 (СССР). Согласующее устройство к магнитно-импульсной установке / Харк. политехню ин-т им. В.И. Ленина. Авт. изобрет. Л.Т. Хименко. – Заявл. 04.02.75. – № 2101814/27; Оpubл. в Б.И., 1977. – № 8; МКИ В 21 D 26/14. 9. Пат. 146403 (ГДР). Vorrichtung zur elektromagnetischen Hochenergieimpulsumformung / Н. – Р. Scheibe, V. Fischer. – Заявл. 11.10.79. – № 216169; Оpubл. 11.02.81; МКИ В 21 D 26/14. 10. Исследование и разработка одновитковых индукторов / В.А. Галкин, О.М. Мосолов, Ю.А. Попов, Е.М. Шалунов. – В кн.: Высоковольтная импульсная техника. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 1976. – Вып.3. – С. 55-62. 11. Пат. 53969 України, В21 Д 26/14. Узгоджувальний пристрій-циліндричний з двома співвісними вторинними витками / Ю.В. Батигін, А.В. Гнатов, Г.С. Сериков, Є.О. Чаплигін, С.О. Драченко; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201004291 заявл. 13.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20. 12. Анализ электродинамических процессов в согласующем устройстве "дискового" типа:

VIII Українсько-Польської конференції молодих науковців ["Механіка та інформатика"], (12-14 травня 2011 р.) Тези наукових праць. / *Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, И.С. Трунова*. – Хмельницький: Хмельницький національний університет, 2011. – С. 19-21. **13.** *Батыгин Ю.В.* Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / *Ю.В. Батыгин, С.Ф. Головащенко, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов* // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: 2010. – № 3 – С. 39-41. **14.** *Гнатов А.В.* Экспериментальные исследования индукторов-инструментов для МИОМ / *А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин* // Харків: Вісник НТУ "ХПИ". 2012. – № 116 – С. 56.

Поступила в редколлегию 24.10.2012



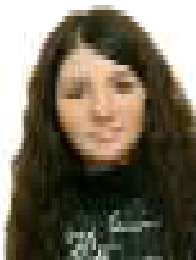
Батыгин Юрий Викторович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук, последнюю в Харьковском политехническом институте по специальности техника сильных электрических и магнитных полей, соответственно в 1972, 1977, 1993 гг. Заведующий кафедрой "Физика" Харьковского национального автомобильно-дорожного университета с 2009 г. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Гнатов Андрей Викторович, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском военный университет по специальности вооружение и военная техника, соответственно в 1998, 2004 гг. Доцент кафедры "Автомобильная электроника" Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Чаплыгин Евгений Александрович – кандидат технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете "ХПИ" по специальности техника сильных электрических и магнитных полей, соответственно в 2003, 2009 гг. Доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Трунова Ирина Сергеевна – защитила диплом инженера, аспирант Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Ассистент кафедры автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.

И.Т. КАРПАЛЮК, канд. техн. наук, ХНАГХ, Харьков

А.А. КАРЮК, соискатель, ХНАГХ, Харьков

**АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ СВЯЗАННЫХ С СОГЛАСОВАНИЕМ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ
ПО ОСНОВНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Определены факторы, влияющие на основные показатели качества электрической энергии, поставлена важность проблемы согласования ПКЭЭ между источниками и потребителями электрической энергии.

Ключевые слова: электроприемники, источник питания, кондуктивные помехи, высшие гармоники тока, показатели качества электрической энергии, согласующие устройства.

Визначено фактори, що впливають на основні показники якості електричної енергії, поставлена важливість проблеми узгодження ПЯЕЕ між джерелами і споживачами електричної енергії.

Ключевые слова: електроприймачі, джерело живлення, кондуктивні завади, вищі гармоніки струму, показники якості електричної енергії, що погодять пристрої.

The factors affecting the main indicators of quality of electric power are determined. The importance of the problem of the indicators of quality of electric power agreement between sources and consumers of electricity is posed.

Keywords: power-consuming equipment, power supply, conducted interference, higher current harmonics, power quality indicators, matching devices.

Введение. На сегодняшний день во всем мире существуют различные стандарты напряжения. Для согласования и адаптации оборудования, создания надежной развязки между источником энергоснабжения и конечным потребителем применяются различные машины и устройства в частности согласующие трансформаторы, на которые и было обращено наше внимание. Подобные схемы включаются в электрическую сеть и используются для электрической развязки между источником и потребителем электроэнергии. Поскольку в системах электроснабжения все приборы, аппараты и другие устройства находятся в общей для них электромагнитной среде, причем любое из устройств является и источником и генератором электромагнитных помех в то же

время на него воздействуют электромагнитные помехи, создаваемые другими источниками. Согласующие трансформаторы применяются для согласования различных устройств к напряжению в центрах обработки информации, медицинских учреждениях для электрической связи, для согласования источников электрической энергии.

Проблема электромагнитной совместимости стала актуальной еще в середине прошлого века, особенно для систем передачи информации, и выдвигается на первый план во всех областях производства, передачи и распространения электроэнергии. Ввиду увеличения количества специфических потребителей и их требований к качеству электрической энергии электрические сети усложняются: введением в эксплуатацию вентильных преобразователей, мощных электроприводов, высокой степенью автоматизации и компьютеризации производства, введением нескольких источников (автономных) электрической энергии в общую сеть, обостряют проблему электромагнитной совместимости в энергосети Украины и не только.

В системах электроснабжения промышленных предприятий зачастую внимание уделяется кондуктивным помехам, которые в сетях низкого напряжения регламентируются ГОСТом 13109-97, он включает далеко не все искажения, которые возникают в электрических сетях, их принято называть показателями электромагнитной совместимости. Поэтому проблема электромагнитной совместимости является одной из важнейших составляющих показателей качества электрической энергии.

В статье рассматриваются основные электроприемники (ЭП) влияющие на качество электрической энергии. Наиболее характерными типами ЭП, широко применяющимися на предприятиях различных отраслей промышленности, являются электромашины и установки электрического освещения, электротермические установки, а также вентильные преобразователи, служащие для преобразования переменного тока в постоянный. Постоянный ток на промышленных предприятиях применяется для питания двигателей постоянного тока, для электролиза, в гальванических процессах, при некоторых видах сварки и т.д.

Бытовые ЭП имеют тоже довольно широкий спектр разнородных потребителей, это пассивные потребители активной мощности (лампы накаливания, утюги, обогреватели и электроплиты); ЭП с асинхронными двигателями работающие в трехфазном режиме (приводы лифтовых установок, насосы водоснабжения, отопления, системы вентиляции); ЭП с коллекторными приводами (дрели, болгарки, пылесосы); сварочные агрегаты переменного и постоянного тока; выпрямительные устройства (для зарядки аккумуляторов); радиоэлектронная аппаратура (телевизио-

ры, компьютеры); высокочастотные установки (СВЧ печи); люминесцентные лампы. Воздействие отдельного бытового ЭП незначительно, но в совокупности они существенно влияют на питающую сеть.

Качество электрической энергии зависит от многих технологических процессов в электроэнергетической системе – высшие гармоники тока, источниками которых являются как электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой, так и элементы электроэнергетической системы.

Проблема обеспечения надлежащего качества электрической энергии, актуальна, как в нашей стране, так и за ее пределами. Объясняется это постоянно растущим внедрением силовых энергопотребителей, что способствует возрастающему влиянию высших гармоник тока на работу как промышленных и бытовых электроприемников, так и на электрооборудование систем электроснабжения и электрических сетей высокого напряжения. В литературе вопросу согласования показателей качества электрической энергии между источниками и потребителями уделено мало внимания, поэтому стоит проблема рассмотрения спектра существующих согласующих устройств.

Высшие гармоники в системах электроснабжения нежелательны по нескольким причинам: это обуславливается дополнительными потерями в электрических машинах, трансформаторах и сетях; усложняется компенсация реактивной мощности в батареях конденсаторов; сокращается срок службы изоляции электрических машин и сам срок работы машин; ухудшается работа автоматики и связи.

Актуальной становится проблема согласования нескольких источников питания и потребителей в одной электрической сети, особенно это касается в сетях низкого напряжения, если в этих сетях используется основная энергетическая сеть и к ней подключаются собственные, альтернативные, генерирующие электрические мощности.

Ввиду негативно влияющих составляющих показателей качества, высших гармоник, генерируемых нелинейными и высокочастотными потребителями возникает необходимость по принятию мероприятий способствующих улучшению электромагнитной обстановки в электрических сетях общего назначения.

Способов решения данной проблемы много. Наша работа была посвящена исследованию малогабаритного согласующего устройства (для обеспечения согласования помехочувствительных электроприемников) и его технических характеристик.

Современные условия постоянно диктуют новые условия к приборам и их свойств, мощностей и размеров. Малогабаритность была

определена исходя из развития требований потребителей, мобильной революции произошедшей в 2007 году: приборы должны быть не только простыми в обращении, надежными, износостойчивыми, долговечными, но и небольших размеров. Иными словами, современные приборы должны быть малогабаритными, поскольку в нынешнее время идет стремительная тенденция к минимизации приборов и устройств, без снижения их мощностей, качеств и свойств. Относительно небольшой вес, габариты, значительно сокращает расходы материалов на производство таких приборов и влечет за собой ряд преимуществ: это экономический эффект, компактность, удобство при транспортировке, возможность установки в любые ячейки производства без их особого конструктивного изменения и т.д.

Список литературы: 1. *Гуляев Е.Н.* Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с сетью при питании нагрузки с нелинейной вольт-амперной характеристикой. 2. *Сидоров И.Н.* Малогабаритные трансформаторы и дроссели. Справочник. Издательство: Радио и связь. – 1985 г. 3. <http://boni2.narod.ru/s3/ur-687.html> – Согласующие устройства на ферритовых магнитопроводах. 4. <http://www.ngpedia.ru/id522463p1.html> – Большая энциклопедия нефти и газа.

Поступила в редколлегию 02.11.2012



Карпалюк Игорь Тимофеевич, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера в Харьковской национальной академии городского хозяйства в 1993 г. Диссертацию кандидата по специальности светотехника та источники света в 1998 г. "Информационных систем и технологий в городском хозяйстве" Харьковской национальной академии городского хозяйства с 2002 г. Интересы связаны экономией электроэнергии, информационными технологиями и электрическими аппаратами на энергосберегающих технологиях.



Карюк Андрей Александрович, ассистент. Защитил диплом магистра электротехнических систем электропотребления Харьковской национальной академии городского хозяйства в 2009 г. Защитил диплом специалиста по специальности "Менеджмент организаций". Ассистент кафедры "Информационных систем и технологий в городском хозяйстве" Харьковской национальной академии городского хозяйства. Интересы связанные с проблемами экономии электрической энергии, альтернативные источники энергии, ИТ технологии.

Л.В. АКИМОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

Д.Г. ЛИТВИНЕНКО, аспірант, НТУ "ХПИ"

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУКРАТНОИНТЕГРИРУЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ
АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
С ДВУХМАССОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ
И НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ**

Рассмотрена методика создания астатической системы регулирования скорости для двухмассового асинхронного электропривода переменного тока с векторным управлением. Реализован комплексный подход к проблеме оптимизации частотно-регулируемых на базе автономного инвертора напряжения электроприводов с двухмассовой механической частью и нелинейным моментом сопротивления.

Ключевые слова: оптимизация, векторно-управляемая система, асинхронный электропривод.

Розглянуто методику створення астатичної системи регулювання швидкості для двомасового асинхронного електроприводу змінного струму з векторним управлінням. Реалізовано комплексний підхід до проблеми оптимізації частотно-регульованих на базі автономного інвертора напруги електроприводів з двохмасовою механічною частиною і нелінійним моментом опору.

Ключові слова: оптимізація, векторно-керуюча система, асинхронний електропривод.

A creation technique of astatic speed regulation system for two-mass asynchronous alternating current electric drive with vector control is considered. The complex approach to problem of optimization of frequency-regulated on the basis of the independent voltage inverter of electric drives with two-mass mechanical part and the nonlinear moment of resistance is realized.

Key words: optimization, vector control system, asynchronous electric drives.

Введение. В ряде электроприводов металлургической промышленности существует необходимость при действии ступенчатого возмущающего воздействия (вхождение металла в валки прокатного стана) обеспечить нулевую площадь ошибки регулирования скорости. С целью решения данной задачи в [1, 2] для одностепенных электроприводов (ЭП) постоянного тока с постоянным моментом сопротивления $M_c = \text{const}$ была предложена методика построения трехкратной интег-

рирующей системы подчиненного регулирования (СПР) скорости вращения. Кроме того, благодаря предложенному в [3] комплексному подходу по улучшению динамических характеристик, данные исследования получили свое развитие на примере систем векторного управления одномассовым асинхронным электроприводом с постоянной и нелинейной нагрузкой [4, 5] и двухмассовым ЭП с постоянной нагрузкой [6]. Отметим, что разработанные при этом методики синтеза и оптимизации астатических регуляторов скорости (РС) применимы также и для ЭП постоянного тока.

Данная статья является логическим продолжением указанных выше исследований [4-6]. Она посвящена созданию и оптимизации по критерию максимальной добротности и запаса устойчивости (МДУ) двукратноинтегрирующей системы регулирования скорости ($v_{U3}=v_{Mc}=2$) для исходно неустойчивого двухмассового асинхронного частотно-управляемого ЭП с векторным управлением и нелинейной нагрузкой (нелинейная нагрузка характерна для режима буксования валков прокатного стана).

Целью работы является реализация комплексного подхода к улучшению динамических характеристик частотно-регулируемого двухмассового асинхронного ЭП с нелинейной нагрузкой путем синтеза астатического РС методом полиномиальных уравнений и последующей оптимизацией его параметров методом диаграмм качества управления (ДКУ), способствующей увеличению добротности системы и ее запаса устойчивости.

Постановка задач исследования. Для достижения поставленной цели в статье решаются следующие задачи:

- непосредственный синтез полиномиальным методом регулятора скорости с астатизмом второго порядка для двукратноинтегрирующей ($v_{U3}=v_{Mc}=2$) системы векторно-управляемого асинхронного ЭП;
- синтез полиномиальным методом РС с астатизмом первого порядка и использовании явления параметрического астатизма для получения РС с $v=2$;
- синтез полиномиальным методом РС с астатизмом первого порядка и построение на его основе методом систем подчиненного регулирования (СПР) двукратноинтегрирующей ($v_{U3}=v_{Mc}=2$) системы;
- оптимизация исследуемых систем с $v=2$ методом ДКУ по критерию максимальной добротности и запаса устойчивости.

Материалы исследования. На рис. 1 в традиционных обозначениях приведена система векторного управления асинхронным элект-

роприводом с двухмассовой механической частью и нелинейной нагрузкой вида:

$$M_C = \begin{cases} M_{C0} + \beta_{C1}\omega; & \beta_{C1} = 18 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; \quad M_{C0} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad 0 \leq \omega \leq 10 \text{ с}^{-1}; \\ -\beta_C \omega; & |\beta_C| = 30 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; \quad 10 \leq \omega \leq 15 \text{ с}^{-1}; \\ +\beta_{C2}\omega; & \beta_{C2} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; \quad 15 \leq \omega \leq 75 \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (1)$$

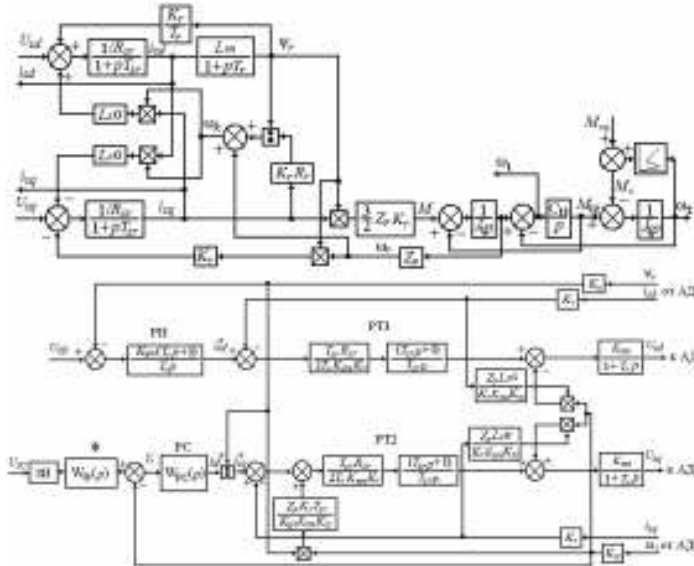


Рис. 1 – Структурная схема АД с КЗ ротором во вращающейся системе координат: а – ориентированная по потокосцеплению ротора; б – система его векторного управления с компенсацией перекрестных обратных связей.

При условии постоянства потокосцепления ротора Ψ_{r0} и компенсации взаимовлияния каналов асинхронного двигателя (АД) в основу исследований взята одноканальная структура рис. 2.

В работе [6] для двухмассового ЭП с постоянной нагрузкой были предложены и реализованы три методики синтеза регуляторов скорости с астатизмом второго порядка. Применим указанные наработки для рассматриваемой системы с нелинейной нагрузкой.

Первая методика синтеза двукратноинтегрирующей системы.

Проведем непосредственный синтез полиномиальным методом астатического РС ($v=2$) пониженного порядка.

С учетом возможности представления передаточной функции

оптимизированного на модульный оптимум замкнутого контура тока звеном первого порядка

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{1/K_T}{(2T_\mu p + 1)}, \quad (2)$$

запишем передаточную функцию объекта в контуре регулирования скорости при работе ЭП на падающем участке характеристики нагрузки:

$$W_{\text{ОБ}}(p) = \frac{U_{\text{ос}}(p)}{U_{\text{рс}}(p)} = \frac{K_O}{(2T_\mu p + 1)} \frac{\left(\frac{\gamma}{\omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_c|}{C_{12}} p + 1 \right)}{\left(\frac{T_c}{\omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)\omega_{12}^2} p^2 + T_c p - 1 \right)}, \quad (3)$$

где коэффициент усиления объекта $K_O = (1,5Z_p K_r \psi_{r0} K_{\text{ДС}}) / (\beta_c K_T)$; K_T – коэффициент датчика тока; Z_p – число пар полюсов; K_r – коэффициент связи ротора; ψ_{r0} – потокосцепление ротора; $K_{\text{ДС}}$ – коэффициент датчика скорости; C_{12} – жесткость упругой механической части; T_μ – малая постоянная времени контура тока; $\omega_{12} = \sqrt{C_{12}\gamma/J_2}$ – резонансная частота упругих колебаний; $J_\Sigma = J_1 + J_2$ – суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции привода; $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$ – параметр, характеризующий соотношения масс; β_c – жесткость механической характеристики нагрузки; $T_c = J_\Sigma/|\beta_c|$ – механическая постоянная времени.

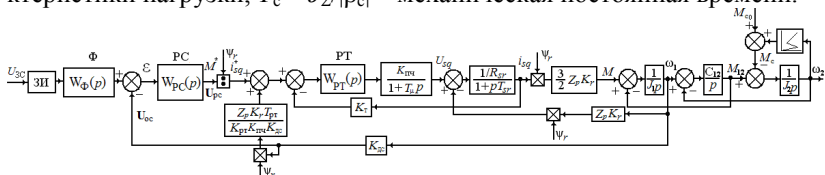


Рис. 2 – Структурная схема системы подчиненного регулирования скорости неустойчивым, под влиянием отрицательного вязкого трения, двухмассового электромеханического объекта.

Представим передаточную функцию объекта (3) в виде

$$W_{\text{ОБ}}(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{K_O P_{\kappa+}(p) P_{n+}(p) P_{-}(p)}{Q_{\kappa+}(p) Q_{n+}(p) Q_{-}(p) p^s}, \quad (4)$$

где $P_{\kappa+}(p)$, $Q_{\kappa+}(p)$ – полиномы, имеющие нули и полюсы с отрицательной вещественной частью, компенсируемые при помощи регулятора; $P_{n+}(p)$, $Q_{n+}(p)$ – полиномы, содержащие только нули и полюсы объекта с отрицательной вещественной частью, в компенсации которых нет необходимости; $P_{-}(p)$, $Q_{-}(p)$ – полиномы, содержащие "правые"

и "нейтральные" нули и полюсы, за исключением расположенных в точке $p=0$, компенсация которых неприемлема из-за нарушения условия грубости; $s=0, 1, 2$ – количество полюсов объекта в точке $p=0$.

Из сравнения (3) и (4) примем:

$$Q_{\kappa+}(p)=(2T_{\mu}p+1); P_{\kappa+}(p)=1; Q_{n+}(p)=1; P_{n+}(p)=1;$$

$$Q_{-}(p)=\frac{T_c}{\omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma-1)\omega_{12}^2} p^2 + T_c p - 1;$$

$$P_{-}(p)=\frac{\gamma}{\omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_c|}{C_{12}} p + 1; s=0.$$

Зададимся астатизмом замкнутой системы регулирования скорости $v_{U3}=v_{Mc}=2$ и запишем на основании метода полиномиальных уравнений передаточную функцию астатического РС пониженного порядка

$$W_{PC}(p)=\frac{Q_{\kappa+}(p)M(p)}{K_O P_{\kappa+}(p)N(p)p^{v-s}}, \quad (5)$$

где $M(p)$, $N(p)$ – неизвестные полиномы, пониженной на единицу степени $i-1$ и $j-1$ соответственно, имеющие вид:

$$\begin{aligned} M(p) &= m_{i-1}p^{i-1} + \dots + m_1p + m_0; \\ N(p) &= n_{j-1}p^{j-1} + \dots + n_1p + n_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты полиномов $M(p)$ и $N(p)$ находятся в результате решения полиномиального уравнения синтеза

$$M(p)P_{-}(p)P_{n+}(p) + N(p)Q_{-}(p)Q_{n+}(p) \cdot p^v = G(p), \quad (7)$$

где $G(p)$ – характеристический полином замкнутой системы, задаваемый исходя из условия обеспечения желаемого переходного процесса, в частности, отвечающий одному из известных стандартных распределений или их видоизменений.

Найдем, обозначаемые в виде $| \cdot |$, степени полиномов, входящих в (4), с учетом (3): $|P_{\kappa+}|=|P_{n+}|=|Q_{n+}|=0$; $|P_{-}|=|P|=2$; $|Q_{-}|=3$; $|Q_{\kappa+}|=1$; $|Q|=4$. Тогда степени полиномов $M(p)$, $N(p)$, и $G(p)$ имеют уменьшенные на единицу величины: $|M|=3$; $|N|=2$; $|G|=7$, т.е.

$$M(p)=m_3p^3+m_2p^2+m_1p+m_0 \text{ и } N(p)=n_2p^2+n_1p+n_0.$$

Запишем уравнение синтеза (7) в развернутой форме слагаемых по мере убывания степени p

$$\begin{aligned}
& \frac{n_2 T_c}{\omega_{12}^2} p^7 + \left(\frac{n_1 T_c}{\omega_{12}^2} - \frac{n_2 \gamma}{(\gamma-1)\omega_{12}^2} \right) p^6 + \left(\frac{m_3 \gamma}{\omega_{12}^2} + \frac{n_0 T_c}{\omega_{12}^2} - \frac{n_1 \gamma}{(\gamma-1)\omega_{12}^2} + n_2 T_c \right) p^5 + \\
& + \left(\frac{m_2 \gamma}{\omega_{12}^2} - \frac{m_3 |\beta_c|}{C_{12}} - \frac{n_0 \gamma}{(\gamma-1)\omega_{12}^2} + n_1 T_c - n_2 \right) p^4 + \\
& + \left(\frac{m_1 \gamma}{\omega_{12}^2} - \frac{m_2 |\beta_c|}{C_{12}} + m_3 + n_0 T_c - n_1 \right) p^3 + \left(\frac{m_0 \gamma}{\omega_{12}^2} - \frac{m_1 |\beta_c|}{C_{12}} + m_2 - n_0 \right) p^2 + \quad (8) \\
& + \left(m_1 - \frac{m_0 |\beta_c|}{C_{12}} \right) p + m_0 = \alpha_7 T_0^7 p^7 + \alpha_6 T_0^6 p^6 + \alpha_5 T_0^5 p^5 + \alpha_4 T_0^4 p^4 + \\
& + \alpha_3 T_0^3 p^3 + \alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0,
\end{aligned}$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$ – коэффициенты выбранного стандартного распределения; $T_0 = 1/\omega_0$ – эквивалентная малая постоянная времени системы, определяемая величиной выбираемого значения среднегометрического корня ω_0 .

Неизвестные коэффициенты m_{i-1} и n_{j-1} полиномов $M(p)$, $N(p)$ находятся из сравнения сомножителей при одинаковых степенях p левой и правой частей уравнения (8). В ряде случаев требуются дополнительные алгебраические преобразования. Коэффициенты m_{i-1} и n_{j-1} имеют следующие значения:

$$n_2 = \frac{\alpha_7 \omega_{12}^2}{T_c \omega_0^7}; \quad n_1 = \frac{\omega_{12}^2}{T_c} \left(\frac{\alpha_6}{\omega_0^6} + \frac{n_2 \gamma}{(\gamma-1)\omega_{12}^2} \right); \quad (9)$$

$$m_1 = \frac{\alpha_1}{\omega_0} + \frac{m_0 |\beta_c|}{C_{12}}; \quad m_0 = \alpha_0;$$

$$\begin{aligned}
m_2 = & \frac{A}{\left(\frac{C_{12} \gamma}{|\beta_c| \omega_{12}^2} - \frac{|\beta_c|}{C_{12}} + A \right)} \left[\frac{\alpha_2}{\omega_0^2} + \frac{\alpha_3}{\omega_0^3 A} + \frac{C_{12} \alpha_4}{|\beta_c| \omega_0^4 A} + \right. \\
& \left. + m_1 \left(\frac{|\beta_c|}{C_{12}} - \frac{\gamma}{\omega_{12}^2 A} \right) - \frac{m_0 \gamma}{\omega_{12}^2} - \frac{n_1}{A} \left(\frac{C_{12} T_c}{|\beta_c|} - 1 \right) + \frac{C_{12} n_2}{|\beta_c| A} \right]; \quad (10)
\end{aligned}$$

$$m_3 = \frac{\omega_{12}^2}{\gamma} \left(\frac{\alpha_5}{\omega_0^5} - n_2 T_c + \frac{n_1 \gamma}{(\gamma-1)\omega_{12}^2} - \frac{n_0 T_c}{\omega_{12}^2} \right); \quad (11)$$

$$n_0 = m_2 - \frac{\alpha_2}{\omega_0^2} + \frac{m_0 \gamma}{\omega_{12}^2} - \frac{m_1 |\beta_c|}{C_{12}}. \quad (12)$$

Согласно (5), передаточные функции астатического РС с $v=2$ пониженного порядка и фильтра Φ на входе системы определяются как

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC} (2T_\mu p + 1) (T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{(T_5^2 p^2 + T_4 p + 1) p^2};$$

$$W_\Phi(p) = \frac{1}{(T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}, \quad (13)$$

где $K_{PC}=m_0/K_0 n_0$; $T_1=m_1/m_0$; $T_2=m_2/m_0$; $T_3=m_3/m_0$; $T_5^2=n_2/n_0$; $T_4=n_1/n_0$.

Для компьютерного моделирования системы векторного управления рис. 1 принято: $C_{12}=7260$ Нм/рад; $\omega_{12}=193,6$ с⁻¹; $J_1=J_2=0,3875$ кгм²; $\gamma=2$; $K_r=0,9808$; $Z_p=4$; $T_{sr}=0,0028$ с; $R_{sr}=1,0657$ Ом; $T_r=0,1088$ с; $L_s=0,07$ Гн; $L_m=0,0683$ Гн; $\sigma=0,0428$. При $U_{3C}=U_{3П}=10$ В учтено, что: $K_t=0,1258$ В/А; $K_{дс}=0,1384$ Вс; $K_{П}=14,6326$ В/Вб; $K_{Пч}=38$; $T_\mu=0,0002$ с; $\psi_{r0}=0,6834$ Вб. При модуле жесткости механической характеристики АД $\beta=28,58$ Н·м·с величина жесткости падающего участка механической характеристики нагрузки взята согласно (1) на уровне $\beta c=-30$ Н·м·с, при котором $\beta c/\beta=-1,05$.

Так как из (9) положительность коэффициентов n_1 , n_2 , m_1 и m_0 очевидна, то значение среднегеометрического корня ω_0 системы с РС (13) находится из условия одновременной положительности коэффициентов m_2 , m_3 и n_0 (10)-(12). На рис. 3,а построены графики зависимостей $n_0=f(\omega_0)$, $m_2=f(\omega_0)$, $m_3=f(\omega_0)$ для распределения "Критическое затухание переходного процесса" седьмого порядка $G(p)=p^7+5,5\omega_0 p^6+14,25\omega_0^2 p^5+22,125\omega_0^3 p^4+22,125\omega_0^4 p^3+14,25\omega_0^5 p^2+5,5\omega_0^6 p+\omega_0^7$.

Согласно рис. 3,а для проведения дальнейших исследований выберем $\omega_0=100$ с⁻¹. Это обеспечивает следующие значения m_{i-1} , n_{j-1} полиномов $M(p)$ и $N(p)$, постоянных времени и коэффициента усиления РС (13):

$$m_3=2,0426 \cdot 10^{-5} \text{ с}^3; m_2=0,0023 \text{ с}^2; m_1=0,0591 \text{ с}; m_0=1; n_2=1,45 \cdot 10^{-8} \text{ с}^2;$$

$$n_1=9,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}; n_0=6,466 \cdot 10^{-3}; K_{PC}=10485; T_3^3=2,0426 \cdot 10^{-5} \text{ с}^3; T_2^2=0,0023 \text{ с}^2;$$

$$T_1=0,0591 \text{ с}; T_5^2=2,2432 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2; T_4=0,0141 \text{ с}.$$

При оптимизации синтезированной двукратноинтегрирующей системы по критерию МДУ, выделим в РС (13) интегральные составляющие. Для этого найдем корни полинома числителя $M(p)$ и представим его в виде произведения двух многочленов. Тогда с учетом введения

переменных b_1 и b_2 и подстановки численных значений коэффициентов получим:

$$W_{PC2}(p) = \frac{10485(0,0004p+1)}{(0,000022p^2 + 0,0141p+1)} \times \frac{(b_1^2 \times 0,0017p^2 + b_1 \times 0,047p+1)}{p} \cdot \frac{(b_2 \times 0,012p+1)}{p}; \quad (14)$$

$$W_{\Phi 2}(p) = \frac{1}{(b_1^2 \times 0,0017p^2 + b_1 \times 0,047p+1)} \cdot \frac{1}{(b_2 \times 0,012p+1)}.$$

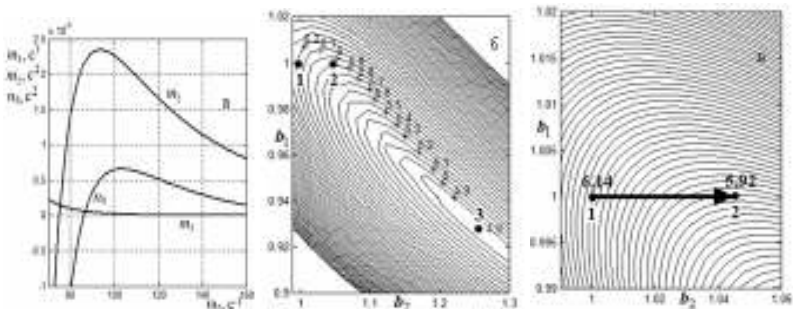


Рис. 3 – Графики зависимостей коэффициентов n_0 , m_2 и m_3 : а – от величины ω_0 ; б – диаграмма качества управления в частотной области; в – ее фрагмент.

На рис. 3,б приведена диаграмма качества управления, на которой изображены в плоскости параметров b_1 и b_2 изолинии частотного показателя колебательности M , служащего мерой запаса устойчивости. Фрагмент диаграммы изображен на рис. 3,в.

На ДКУ точка 1 соответствует исходной настройке системы при $b_1=1$, $b_2=1$ с $M=6,14$. При оптимизации $b_2=\text{var}$ и $b_1=\text{const}$ ($b_1=1$, $b_2=1,05$) точка 2 показатель колебательности M понижается до 5,92, что на 3,7% меньше исходного значения M . При одновременной настройке b_1 и b_2 ($b_1=0,925$, $b_2=1,27$) точка 3 достигнуто уменьшение показателя колебательности M на 28 % с 6,14 до 4,8.

АЧХ и переходные характеристики по скорости ω_2 при отсутствии фильтра на входе для трех рассматриваемых точек представлены на рис. 4. Они подтверждают улучшение динамических характеристик двукратноинтегрирующей системы с РС (13) в точках 2 и 3 по сравнению с исходной 1.

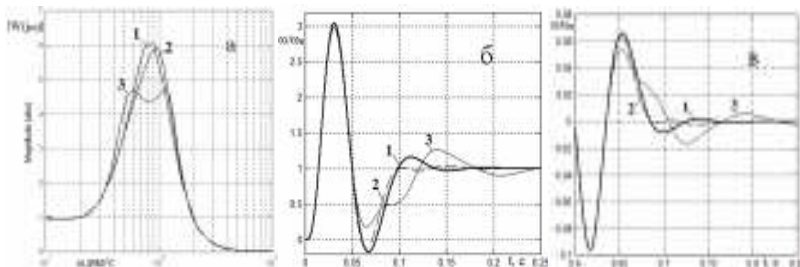


Рис.4 – Амплитудные частотные характеристики; а – замкнутой системы по скорости ω_2 ; б – переходные характеристики при отсутствии фильтра на входе системы по управлению; в – по возмущению.

Вторая методика синтеза двукратноинтегрирующей системы.

Она заключается в синтезе полиномиальным методом однократно-интегрирующей системы управления ($v_{U3}=v_{Mc}=1$) с астатическим РС пониженного порядка и использованием явления параметрического аста-тизма для создания двукратноинтегрирующей системы с $v_{U3}=v_{Mc}=2$. Основываясь на [7], сразу запишем передаточные функции астатического РС пониженного порядка и фильтра Φ на входе системы:

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC} (2T_{\mu}p + 1) (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{(T_4^2 p^2 + T_3 p + 1)p};$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}, \quad (15)$$

где постоянные времени $T_1 = m_1/m_0$; $T_2^2 = m_2/m_0$; $T_4^2 = n_2/n_0$; $T_3 = n_1/n_0$; $K_{PC} = m_0/(n_0 K_O)$.

Расчет параметров астатического РС (15) выполнен с использованием распределения, отвечающего критическому затуханию переходного процесса шестого порядка $G(p) = \alpha_6 p^6 + \alpha_5 \omega_0 p^5 + \alpha_4 \omega_0^2 p^4 + \alpha_3 \omega_0^3 p^3 + \alpha_2 \omega_0^4 p^2 + \alpha_1 \omega_0^5 p + \alpha_0 \omega_0^6$ со значениями коэффициентов $\alpha_0=1$; $\alpha_1=4,5$; $\alpha_2=9,75$; $\alpha_3=12,375$; $\alpha_4=9,75$; $\alpha_5=4,5$; $\alpha_6=1$.

На рис. 5,а построены графики изменения коэффициентов m_{22} , m_{21} и n_0 в функции ω_0 .

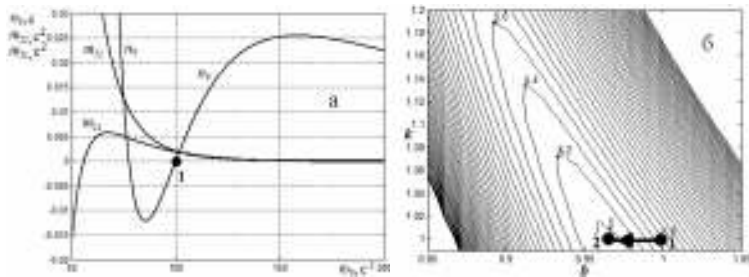


Рис. 5 – Графики зависимостей коэффициентов m_{22} , m_{21} и n_0 ; а – от величины ω_0 ; б – диаграмма качества управления в частотной области.

Согласно рис. 5,а график $n_0=f(\omega_0)$ дважды пересекает ось абсцисс при $\omega_0=75\text{с}^{-1}$ и $\omega_0=100\text{с}^{-1}$. Однако только в случае $\omega_0=100\text{с}^{-1}$, когда $m_{22}\approx m_{21}$ наблюдается явление параметрического астатизма. При введении новой постоянной времени $T_5=n_2/n_1$ и изменении коэффициента усиления регулятора скорости до величины $K_{PC}^*=m_0/K_0n_1$, передаточная функция РС (15), отвечающая параметрическому астатизму в системе, представляется как:

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}^*(2T_\mu p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{(T_5 p + 1)p^2}. \quad (16)$$

При $n_0=0$ однократноинтегрирующая система с РС (15) становится двукратноинтегрирующей с РС (16). Величина $\omega_0=100 \text{ с}^{-1}$ определяет следующие значения коэффициентов полиномов $M(p)$ и $N(p)$: $m_2=0,0021 \text{ с}^2$, $m_1=0,0491 \text{ с}$, $m_0=1$ и $n_2=1,45 \cdot 10^{-6} \text{ с}^3$, $n_1=0,000765 \text{ с}^2$ а также постоянных времени и коэффициента усиления регулятора:

$$K_{PC}^*=8862; T_2^2=0,0021 \text{ с}^2; T_1=0,0491 \text{ с}; T_5=0,0019 \text{ с}.$$

Проведем оптимизацию системы с РС (16) по критерию МДУ. Для этого введем в коэффициент усиления и постоянную времени числителя РС (16) переменные k и b , тогда для численных значений регулятора получим:

$$W_{PC}(p) = \frac{k \cdot 8862,3(0,0004 p + 1)(b^2 \times 0,0021 p^2 + b \times 0,0491 p + 1)}{(0,0019 p + 1)p^2}. \quad (17)$$

На рис. 5,б построена ДКУ в частотной области, где точка 1 отвечает исходной настройке РС с параметрами $k=1$ и $b=1$; точка 2 – настройка по критерию МДУ при $k=1$ и $b=0,965$.

Отметим понижение показателя колебательности M на 16%

с $M=5,8$ в исходной точке настройки 1 до $M=5$ в оптимальной по критерию МДУ точке 2. Соответствующие АЧХ и переходные характеристики приведены на рис. 6.

Третья методика синтеза двукратноинтегрирующей системы.

Допустим, что согласно первой методики синтезирована передаточная функция РС (15) для системы с астатизмом первого порядка ($v_{U3}=v_{Mc}=1$). Согласно рис. 5, который отвечает этому случаю, из условия $m_{22}=m_{21}=m_2$ выбрано $\omega_0=104 \text{ с}^{-1}$. Тогда для коэффициентов m_{i-1} , n_{j-1} имеем значения: $m_2=0,0016 \text{ с}^2$, $m_1=0,0516 \text{ с}$, $m_0=1$ и $n_2=0,00000114 \text{ с}^3$, $n_1=0,000625 \text{ с}^2$, $n_0=0,0042 \text{ с}$, а также $K_{PC}=1597$; $T_2^2=0,0016 \text{ с}^2$; $T_1=0,0516 \text{ с}$; $T_4^2=0,0003 \text{ с}^2$; $T_3=0,1473 \text{ с}$.

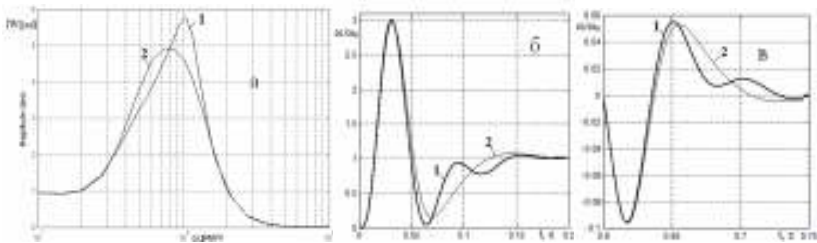


Рис. 6 – Амплитудные частотные характеристики замкнутой системы:
а – по скорости ω_2 ; б – переходные характеристики по управлению;
в – по возмущению.

Используя методы СПР и рекомендации, указанные в [2], а также РС (15), получим передаточную функцию астатического РС с $v=2$ и необходимого фильтра на входе системы:

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}(2T_{\mu}p+1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{(T_4^2 p^2 + T_3 p + 1)p} \cdot \frac{(\gamma^* T_0 p + 1)}{\gamma^* T_0 p}; \quad (18)$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)(\gamma^* T_0 p + 1)},$$

где $4 \leq \gamma^* \leq \infty$ – параметр настройки.

На основании [2] примем $\gamma^*=10$. Тогда при $T_0=1/\omega_0=0,0096 \text{ с}$ передаточная функция астатического РС (18) и фильтра на входе системы, при их оптимизации по критерию МДУ за счет введения в постоянные времени полиномов числителя регулятора переменных b_1 и b_2 , принимают вид:

$$W_{PC}(p) = \frac{1597(b_1^2 \cdot 0,0016p^2 + b_1 \cdot 0,0516p + 1)(0,0004p + 1)(b_2 \cdot 0,096p + 1)}{(0,00027p^2 + 0,1473p + 1)p \cdot 0,096p}, \quad (19)$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(b_1^2 \times 0,0016p^2 + b_1 \times 0,0516p + 1)} \cdot \frac{1}{(b_2 \times 0,096p + 1)}.$$

Для системы векторного управления асинхронным ЭП рис. 2 с астатическим РС (19) была построена ДКУ в частотной области (рис. 7, а, б), где точка 1 отвечает исходной настройке регулятора с параметрами $b_1=1$ и $b_2=1$; точка 2 – настройка по критерию МДУ при $b_1=\text{const}$ и $b_2=\text{var}$ ($b_1=1$ и $b_2=1,025$); точка 3 – настройка по критерию МДУ при вариации двух параметров b_1 и b_2 ($b_1=1,202$ и $b_2=0,7$); точка 4 – настройка по критерию МДУ при $b_1=\text{var}$ и $b_2=\text{const}$ ($b_1=1,017$ и $b_2=1$). Кроме того, на рис. 7, в представлены амплитудные частотные характеристики замкнутой системы для четырех рассматриваемых настроек.

Согласно диаграмме и АЧХ система с исходной настройкой (точка 1) имеет показатель колебательности $M=10,9$. Оптимизация на максимальный запас устойчивости при вариации только параметра b_1 (точка 4) понижает показатель колебательности на 3,4 % до значения $M=10,54$. При настройке только параметра b_2 (точка 2) по критерию МДУ M снижается до 10,76, что на 1,3% меньше его исходного значения. Максимальный запас устойчивости $M=8,44$ достигается при одновременной вариации параметров b_1 и b_2 (точка 3). В этом случае выигрыш составляет 29 %.

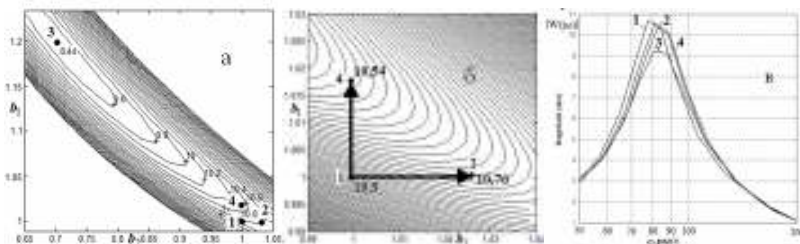


Рис. 7 – Диаграмма качества управления: а – в частотной области; б – ее фрагмент; в – амплитудные частотные характеристики замкнутой системы по скорости ω_2 для четырех точек настройки.

На рис. 8 показаны переходные характеристики по управлению – а и по возмущению – б в указанных четырех точках настройки оптимизируемой системы. Из представленных рисунков видна малая эффективность во временной области оптимизации по критерию МДУ регулятора, отвечающего формуле (19), синтезированного по третьей методике.

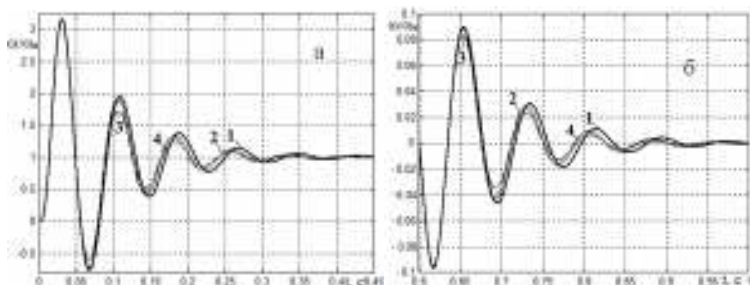


Рис. 8 – Переходные характеристики: а – по управлению; б – по возмущению.

Оценка параметрической чувствительности системы с астатическим регулятором (16) при вариации параметров C_{12} и J_2 в два раза приведена на рис. 9,а и 9,б соответственно, где представлены переходные характеристики, отвечающие: 1 – исходным значениям параметров; 2 – уменьшению параметра на 20%; 3 – увеличению параметра на 60%.

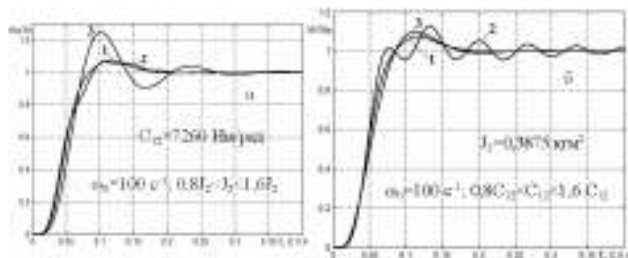


Рис. 9 – Переходные характеристики при изменении J_2 и C_{12} в системе с астатическим РС (16) с соответствующим фильтром на входе: а – при изменении C_{12} ; б – при изменении J_2 .

Выводы. На примере двухмассового частотно-управляемого асинхронного электропривода, работающего на падающем участке нелинейной характеристики нагрузки, реализован комплексный подход по улучшению динамических характеристик, основанный на поэтапном применении методов полиномиальных уравнений и диаграмм качества управления. Подтверждена эффективность разработанных методик синтеза и оптимизации систем с астатическими регуляторами скорости различной степени сложности. Указанные выводы носят общий характер и распространяются на электроприводы постоянного тока с аналогичной структурой системы управления.

Список литературы: 1. Динамика трехкратноинтегрирующей системы подчиненного регулирования привода постоянного тока / *Миткевич В.Г., Церазова Е.А., Целлагов А.П., Ямпольский Д.С.* Электричество. – 1981. – № 1. – С. 26-31. 2. *Крупович В.И.* Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / *Крупович В.И., Барыбин Ю.Г. Самовер М.Л.* – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с. 3. *Акимов Л.В.* Синтез астатического регулятора скорости для системы векторного управления одномассовым асинхронным электроприводом с нелинейной нагрузкой / *Л.В. Акимов, Д.Г. Литвиненко* // Наукові праці "Донецького національного технічного університету" серія "Електротехніка і енергетика" випуск № 11 (186). – Донецьк: ДВНЗ "ДонНТУ". – 2011. – С. 16-23. 4. *Акимов Л.В.* Улучшение динамики трехкратноинтегрирующего асинхронного электропривода с векторным правлением методом диаграмм качества управления / *Л.В. Акимов, Д.Г. Литвиненко* // научно-технический журнал "Электротехнические и компьютерные системы" № 02 (78). – Киев: "Техника". – 2011. – С. 13-19. 5. *Акимов Л.В.* Синтез двукратноинтегрирующей системы векторного управления одномассовым асинхронным электроприводом с нелинейной нагрузкой / *Л.В. Акимов, Д.Г. Литвиненко, А.А. Вакуленко* // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 12. – С. 96-111. 6. *Акимов Л.В.* Динамика трехкратноинтегрирующей системы векторного управления двухмассового асинхронного электропривода с постоянной нагрузкой / *Л.В. Акимов, Д.Г. Литвиненко* // Научно-технический журнал "Электротехнические и компьютерные системы" № 05 (81). – Киев: "Техника". – 2012. – С. 7-15. 7. *Акимов Л.В.* Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния: Монография / *Л.В. Акимов, В.И. Колотило, В.С. Марков.* – Харьков: ХГПУ, 2000. – 93 с.

Поступила в редколлегию 08.12.2012



Акимов Леонид Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры "Автоматизированные электромеханические системы", НТУ "ХПИ". В 1989 г. защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию и в 1990 году получил ученое звание профессор. Является отличником высшей школы, изобретателем СССР, награжден медалями ВДНХ СССР за выполненные разработки промышленных электроприводов. Неизменной с 1956 г. областью инженерных и научных интересов является электропривод.



Литвиненко Дмитрий Григорьевич, аспирант кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" НТУ "ХПИ". В 2007 г. закончил Харьковский политехнический институт по специальности "Электробытовая техника". В 2007 г. поступил в аспирантуру с отрывом от производства. Научные интересы – улучшение динамических характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением при нелинейном характере нагрузки использованием методов полиномиальных уравнений и диаграмм качества управления.

С.А. ТКАЧ, аспирант, ВНУ им. В. Даля, Луганск;
И.А. ШВЕДЧИКОВА, д-р техн. наук, проф., ВНУ им. В. Даля,
Луганск

СИНТЕЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ МНОГОИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье рассмотрена генетическая модель структурообразования электромеханических многоиндукторных систем для магнитной сепарации, а также дано теоретическое обоснование метода генерации вариантов пространственных компоновок цилиндрических многоиндукторных магнитосепарирующих систем и описание правил построения подобных систем для реальных технических устройств. Сделаны выводы о возможных теоретических и реальных количествах компоновок для многоиндукторных магнитосепарирующих систем. Достоверность описанного метода создания электромеханических систем была подтверждена практически.

Ключевые слова: изомер, индуктор, направленная генерация, симметрия, электромеханическая система.

У статті розглянуто генетичну модель структуроутворення електромеханічних багатоіндукторних систем для магнітної сепарації, а також наведено теоретичне обґрунтування метода генерації варіантів просторових компонувань циліндричних багатоіндукторних магнітосепаруючих систем та описані правила побудови подібних систем для реальних технічних пристроїв. Зроблено висновки щодо можливої кількості теоретичних та реальних компонувань для багатоіндукторних магнітосепаруючих систем. Достовірність запропонованого метода створення електромеханічних систем підтверджується на практиці.

Ключові слова: ізомер, індуктор, спрямована генерація, правило, симетрія, електромеханічна система.

A genetic model of the structure formation of electromechanical multi-inductor systems for magnetic separation is considered in this paper. The theoretical justification of the method of spatial design variants generation of cylindrical multi-inductor systems for magnetic separation is also given there. In addition, description of construction rules for such systems for real engineering devices is presented. The number of possible theoretical and real configurations for multi-inductor systems for magnetic separation has been concluded. The accuracy of described method of electromechanical systems design has been practically confirmed.

Keywords: isomer, inductor, directional generation, symmetry, electromechanical system.

Введение. Основой конструктивного исполнения целого ряда электромеханических устройств являются многоиндукторные системы, однотипные элементы которых образуют те или иные пространственные композиции. В частности, к многоиндукторным относятся магнитные сепараторы модульного типа, широко применяемые на практике [1, 2].

Анализ основных исследований и литературы. Свойство, связанное с наличием множества вариантов пространственного размещения (или компоновок) из одинакового количества идентичных элементов, называется пространственной изомерией (от др.-греч. ἴσος – равный и ἔρος – доля, часть), а множества их пространственных компоновок – пространственными изомерами. Термин "изомерия" нашел широкое применение в различных областях науки, в том числе в математике, химии, физике, биологии и т.д. [3, 4].

Научное обоснование генетической природы электромагнитной изомерии позволило выполнить постановку системных задач, непосредственно связанных с разработкой новых методов направленного синтеза пространственных структур-изомеров и их практического использования при создании многоэлементных электромеханических систем различного назначения [5]. Определение области существования и разработка генетической модели структурообразования видов магнитных сепараторов открыли возможности для практической реализации процедуры направленного синтеза пространственных изомерных композиций электромеханических структур магнитных сепараторов [6-8].

Цель исследования. Целью работы является применение метода синтеза пространственных изомерных композиций для получения полной информации о возможных пространственных компоновках многоиндукторных электромеханических систем для магнитной сепарации.

Материалы и результаты исследования. Одним из наиболее мощных источников структурного разнообразия в генетической концепции видообразования электромеханических систем является генетический оператор репликации f_R (коэффициент репликации $k_R=2, 3, \dots$), отвечающий за изменение количественного состава основных компонентов генетической структуры. Метод синтеза пространственных изомерных композиций основан на последовательном применении генетического оператора репликации f_R и группы геометрических преобразований, основанных на использовании того или иного вида симметрии [4, 9].

Указанный метод был применен на этапе системного проектирования многоиндукторных магнитносепарирующих устройств, предназначенных для использования в конвейерных системах. Процедура синтеза была реализована для доминирующих в пределах функциона-

льного класса магнитных сепараторов структур рода цилиндрических базовых видов **ЦЛ 0.2y** и **ЦЛ 2.2y** [10].

Достижение поставленной в статье цели предполагает разработку генетической модели структурообразования видов многоиндукторных электромеханических систем для магнитной сепарации с учетом следующих допущений:

1. Исключаются из рассмотрения генетические операторы мутации (отвечает за изменение геометрических размеров и пространственной формы элементов структуры) и электромагнитной инверсии (моделирует процессы, связанные с изменением пространственной ориентации вращающихся электромагнитных полей).

2. Числовые значения коэффициента репликации по индуктору принимаются равными: $k_{RI} = 2, 3, 4$. Максимальное значение коэффициента репликации ($k_{RI}=4$) принимается, исходя из условий практической целесообразности.

Графическая интерпретация генетической модели структурообразования видов многоиндукторных электромеханических систем для магнитной сепарации представлена на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ПИП – первичный источник электромагнитного поля, образующий пространственную поверхность с заданным видом и законом распределения электромагнитного поля; $S_{0(1)}$, $S_{0(2)}$ – первичная твердотельная (индуктор магнитного поля) и вторичная дискретная (извлекаемые ферромагнитные тела) структуры соответственно; S_0 – электромеханическая пара или хромосомный набор 1-го поколения; S_{21} – синтезированная электромеханическая структура или хромосомный набор 2-го поколения, представленный реплицированными (по индуктору) порождающими структурами S_{212I} ($k_{RI}=2$), S_{213I} ($k_{RI}=3$), S_{214I} ($k_{RI}=4$); f_{CH} – генетический оператор неоднородного скрещивания, моделирующий совмещение структур различной генетической природы; f_{RI} – оператор репликации, отвечающий за изменение количественного состава элементов первичной твердотельной структуры ($k_{RI}=2, 3, 4$); P_{212b} , P_{213b} , P_{214b} – структурные популяции двух-, трех- и четырехиндукторных систем, соответственно.

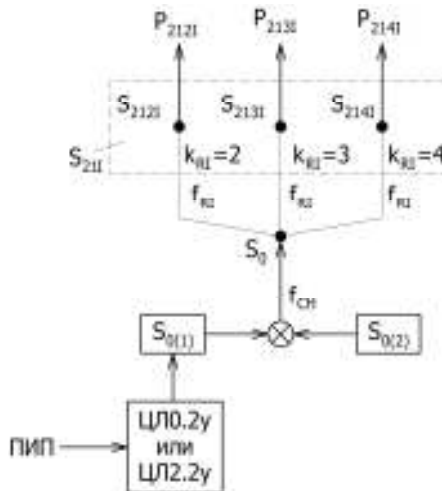


Рис. 1 – Генетическая модель структурообразования видов многоиндукторных цилиндрических систем для магнитной сепарации.

Исходной пространственной структурой при реализации процедуры синтеза является хромосома-репликатор 1-го поколения S_0 ($k_{RI}=1$), отвечающая за наследственные признаки одноиндукторных систем магнитных сепараторов,

$$(S_{0(1)} \times S_{0(2)}) \rightarrow S_0. \quad (1)$$

За наследственные признаки многоиндукторных ($2 \leq k_{RI} \leq 4$) цилиндрических систем магнитных сепараторов отвечает реплицированная хромосома S_{21I}

$$S_{21I} = k_{RI} S_0, \quad (2)$$

представленная набором порождающих реплицированных структур S_{212I} , S_{213I} , S_{214I} , отвечающих за наследственные признаки двух-, трех- и четырехиндукторных систем, соответственно.

Конечные множества пространственных изомерных композиций, синтезированные на основе реплицированных структур S_{212I} , S_{213I} , S_{214I} , могут быть представлены в виде

$$f(S_{212I}) \rightarrow (S_{212I1}, S_{212I2}, \dots, S_{212Ik}), \quad (3)$$

$$f(S_{213I}) \rightarrow (S_{213I1}, S_{213I2}, \dots, S_{213Ip}), \quad (4)$$

$$f(S_{214I}) \rightarrow (S_{214I1}, S_{214I2}, \dots, S_{214Iq}), \quad (5)$$

где f – оператор геометрического преобразования; k, p, q – максимальное количество практически реализуемых (в рамках поставленной задачи) пространственных изомеров при $k_{RI}=2$, $k_{RI}=3$ и $k_{RI}=4$, соответственно.

Величины k_T , p_T , q_T определяют теоретически возможное максимальное количество пространственных изомерных композиций, которое может быть найдено, исходя из следующих соображений.

Цилиндрический индуктор в общем виде можно представить отрезком прямой с координатами (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) . У данного отрезка может быть 7 вариантов расположения в трехмерной системе координат $Oxyz$:

1. Параллелен оси Ox .
2. Параллелен оси Oy .
3. Параллелен оси Oz .
4. Параллелен плоскости xOy .
5. Параллелен плоскости yOz .
6. Параллелен плоскости xOz .
7. Расположен произвольным образом относительно начала координат.

Теоретически возможное максимальное количество M_T пространственных композиций для системы, содержащей N индукторов, расположенных независимо друг относительно друга, в общем виде может быть определено следующим образом [9]

$$M_T = 7^N. \quad (6)$$

С учетом введенного допущения на максимальное значение коэффициента репликации ($k_{RI}=4$) теоретически возможное количество пространственных композиций для двух-, трех- и четырехиндукторных систем составит соответственно: $k_T = 7^2 = 49$; $p_T = 7^3 = 343$; $q_T = 7^4 = 2401$.

Очевидно, что максимальное число, практически реализуемых пространственных изомерных композиций, всегда будет меньше теоретически возможного их числа ($k < k_T$, $p < p_T$, $q < q_T$) из-за ограничений, связанных с компоновкой индукторов в пределах конвейерной системы. Если принять, что конвейерная лента расположена в плоскости xOy , а направление ее движения совпадает с положительным направлением оси Ox , то могут быть введены следующие ограничения на расположение индукторов относительно конвейерной ленты:

– индуктор не может быть расположен параллельно оси Ox , что обусловлено принадлежностью рассматриваемых систем к базовым видам **ЦЛ 0.2у** и **ЦЛ 2.2у** вращательного движения с чередованием полярности полюсов в направлении оси Oy ;

– индуктор не может быть расположен параллельно оси Oz , т.к. в этом случае над конвейерной лентой будут размещены неактивные торцевые части индукторов;

– индуктор не может быть расположен параллельно плоскости xOz , что следует из двух предыдущих ограничений.

Правила симметрии для построения пар индукторов в системе следующие:

1. Симметрия относительно оси Ox .
2. Симметрия относительно оси Oy .
3. Симметрия относительно оси Oz .
4. Симметрия относительно плоскости xOy .
5. Симметрия относительно плоскости yOz .
6. Симметрия относительно плоскости xOz .
7. Симметрия относительно начала координат.

В общем случае расчет реального количества M возможных вариантов пространственных композиций изомеров для многоиндукторных магнитосепарирующих систем в поставленных условиях может быть выполнен по формуле [9]

$$M = ijmn, \quad (7)$$

где i – вариант расположения первого индуктора в системе; j – правило симметрии для построения первой пары индукторов в системе; m – вариант расположения третьего индуктора в системе; n – правило симметрии для построения второй пары индукторов в системе.

Следовательно, возможное количество практически реализуемых пространственных композиций k , p и q изомеров для рассматриваемых электромеханических систем составит: $k = 4 \cdot 7 = 28$ – для двухиндукторной системы; $p = 4 \cdot 7 \cdot 4 = 112$ – для трехиндукторной системы; $q = 4 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 7 = 784$ – для четырехиндукторной системы.

Номера пространственных композиций t_2 , t_3 и t_4 из множеств S_{212I} , S_{213I} и S_{214I} , соответственно, следует определять по формулам, учитывающим теоретически возможные варианты расположения индукторов в системе и правила симметрии для их построения,

$$t_2 = i + 7(j - 1), \quad (8)$$

$$t_3 = i + 7(j - 1) + 49(m - 1), \quad (9)$$

$$t_4 = i + 7(j - 1) + 49(m - 1) + 343(n - 1). \quad (10)$$

Фрагмент с результатами синтеза и графической визуализацией синтезированных пространственных изомерных композиций (генетические коды **2ЦЛ 0.2y** и **2ЦЛ 2.2y**) для двухиндукторных (порождающая структура S_{212I}) магнитосепарирующих систем конвейерного типа базовых видов **ЦЛ 0.2y** и **ЦЛ 2.2y** представлен в таблице.

С помощью рассмотренного выше подхода была синтезирована структура $S_{212/40}$ базового вида **2ЦЛ2.2y** (рис. 2), новизна которой под-

тверждена патентом [11]. Еще две структуры ($S_{212/32}$, $S_{212/19}$) находится в стадии патентования.

Отличительной особенностью синтезированного устройства (рис. 2) является то, что оно не только обеспечивает непрерывность процесса удаления и последующей разгрузки ферромагнитных предметов, но и предусматривает возможность изменения с помощью подвесов 3 и 4 угла α установки индукторов к основе транспортера при изменении угла естественного откоса сыпучего материала, находящегося на ленте транспортера, что повышает эффективность процесса сепарации.

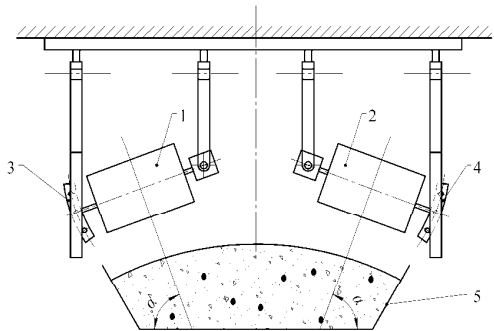
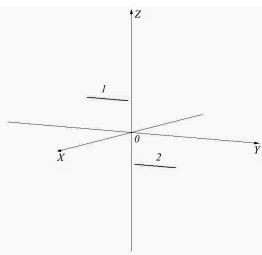
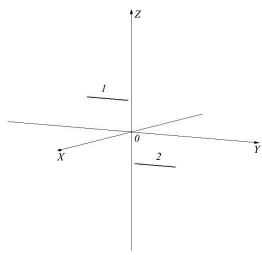
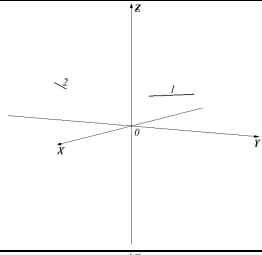
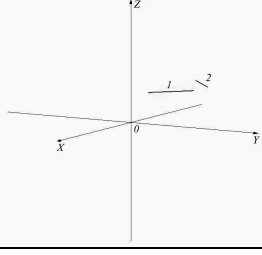


Рис. 2 – Устройство для магнитного разделения сыпучих материалов **2ЦЛ2.2** [11]: 1, 2 – индукторы электромагнитного поля; 3, 4 – подвесы, 5 – транспортер.

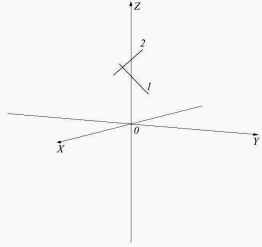
Таблица – Некоторые результаты синтеза пространственных изомеров в структуре генома базовых видов **ЦЛ 0.2у** и **ЦЛ 2.2у** цилиндрических магнитносепарирующих систем конвейерного типа* (генетические коды пространственных изомеров – **2ЦЛ 0.2у** и **2ЦЛ 2.2у**)

Геометрическая модель пространственного изомера	Генетический код изомера	Вид симметрии	Описание электромеханической системы
1	2	3	4
	$S_{212/40}$	Зеркальная симметрия относительно плоскости xOz	Двухиндукторная система с расположением индукторов 1 и 2 вращательного движения над конвейерной лентой и под углом к ее плоскости

Продолжение таблицы

1	2	3	4
	$S_{212/44}$	Центральная симметрия относительно начала координат	Двухиндукторная система с расположением индукторов вращательного движения: 1 – над и 2 – под конвейерной лентой, соответственно, параллельно плоскости конвейерной ленты
	$S_{212/44}$	Центральная симметрия относительно начала координат	Двухиндукторная система с расположением индукторов вращательного движения: 1 – над и 2 – под конвейерной лентой, соответственно, параллельно плоскости конвейерной ленты
	$S_{212/39}$	Зеркальная симметрия относительно плоскости xOz	Двухиндукторная система с расположением индукторов 1 и 2 вращательного движения под углом друг к другу, над или под конвейерной лентой и параллельно ее плоскости
	$S_{212/32}$	Зеркальная симметрия относительно плоскости yOz	Двухиндукторная система с расположением индукторов 1 и 2 вращательного движения над или под конвейерной лентой, параллельно ее плоскости и под углом друг к другу

Окончание таблицы

1	2	3	4
	$S_{212/19}$	Осевая симметрия относительно оси Oz	Двухиндукторная система с расположением индукторов 1 и 2 вращательного движения над конвейерной лентой, друг за другом по ходу ее движения и под углом к плоскости конвейерной ленты
* – конвейерная лента расположена в плоскости xOy , направление ее движения совпадает с положительным направлением оси Ox			

Выводы: 1. Разработана генетическая модель структурообразования видов многоиндукторных цилиндрических систем для магнитной сепарации (на примере базовых видов **ЦЛ 0.2у** и **ЦЛ 2.2у**) с использованием генетических операторов скрещивания и репликации.

2. Определено теоретически возможное максимальное количество пространственных изомерных композиций многоиндукторных систем (при $k_{RI} \leq 4$); предложены правила построения описанных композиций.

3. Установлено максимальное количество практически реализуемых пространственных изомерных композиций с учетом ограничений, связанных с компоновкой индукторов в пределах конвейерной системы, которое составило: 28 композиций – для двухиндукторных систем; 112 композиций – для трехиндукторных систем; 784 композиции – для четырехиндукторных систем.

4. Возможность направленной генерации новых структур многоиндукторных систем, новизна которых подтверждена патентами, свидетельствует об адекватности проведенной процедуры синтеза.

5. Дальнейшие системные исследования многоиндукторных устройств для магнитной сепарации связаны с разработкой системы автоматизированного синтеза пространственных изомерных композиций.

Список литературы: 1. Загирняк М.В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз, И.А. Шведчикова. – К.: Техника, 2010. – 224 с. 2. Загирняк М.В. Исследование, расчет и усовершенствование шкивных магнитных сепараторов / М.В. Загирняк. – К.: ИСМО, 1996. – 448 с. 3. Шинкаренко В.Ф. Структурная изомерия и ее моделирование в задачах генетического синтеза электромеханических структур / В.Ф. Шинкаренко, А.А. Августиневич, В.В. Лысак, М.А. Вахновецкая // Электротехника і електромеха-

ніка. – 2009, – №1. – С. 33-36. **4.** *Урманцев Ю.А.* Симметрия природы и природа симметрии: Философские и естественно-научные аспекты / *Ю.А. Урманцев.* – М.: Мысль, 1974. – 229 с. **5.** *Шинкаренко В.Ф.* Генетичний синтез просторових ізомерів в структурі геному само гальмівних електромеханічних систем поступального руху / *В.Ф. Шинкаренко, Ю.В. Гайдаєнко, К.О. Бенза* // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Випуск 3 (56). – Частина 1. – С.81-85. **6.** *Шинкаренко В.Ф.* Решение задач поискового проектирования магнитных сепараторов с использованием структурно-системного подхода / *В.Ф. Шинкаренко, М.В. Загирняк, И.А. Шведчикова* // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – №1. – С. 69-76. **7.** *Shinkarenko V.F., Zagirnyak M.V., Shvedchikova I.A.* Structural-Systematic Approach in Magnetic Separator Design // *Studies in Computational Intelligence / Computational Methods for the Innovative Design of Electrical Devices.* – 2011. – Vol. 327. – P. 201-217. **8.** *Шведчикова И.А.* Определение инновационного потенциала функционального класса магнитных сепараторов / *И.А. Шведчикова* // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2009. – Випуск 3 (56). – Частина 2. – С.86-89. **9.** *Ильин В.А.* Аналитическая геометрия. / *В.А. Ильин, Э.Г. Позняк.* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 240 с. **10.** *Шинкаренко В.Ф.* Макрогенетический анализ и ранговая структура систематики магнитных сепараторов / *В.Ф. Шинкаренко, М.В. Загирняк, И.А. Шведчикова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №5. – С.33-39. **11.** Пат. на корисну модель 69845 Україна, МПК В03С 1/04. Пристрій для магнітного розділення сипучих матеріалів / *Шведчикова І.О., Ткач С.А., Орлов А.П.*; заявник і власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201114149; заявл. 30.11.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

Надійшла до редколегії 30.10.2012

И.А. ЦОДИК, канд. техн. наук, доц., ДонГТУ, Алчевск
К.В. ХУДОБИН, аспирант, ДонГТУ, Алчевск

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА С КВАЗИЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

По результатам исследований на математической модели рассчитаны характеристики двигателя. Оценено влияние демпфирующих индуктивностей. На пульсирующие моменты, величину среднего момента и действующего значения тока, при разных скоростях вращения.

Ключевые слова: привод, индуктивность, квазичастотный конвейер.

За результатами досліджень на математичній моделі розраховані характеристики двигуна. Оцінено вплив демпфуючих індуктивностей. На пульсуючі моменти, величину середнього моменту і діючого значення струму, при різних швидкостях обертання.

Ключові слова: привід, індуктивність, квазичастотний конвеєр.

According to the results of the research on the mathematical model, characteristics of the motor are calculated. The effect of damping inductances on pulsating torques, average torque and the effective value of the current at different speeds of revolution is estimated.

Keywords: drive, inductance, quasi-frequency conveyor.

Введение. Одним из требований к современным шахтным скребковым конвейерам – это возможность работы с пониженной скоростью. Пониженная скорость нужна для транспортировки технологических грузов и снижения динамических нагрузок при пуске. Так как на пониженной скорости конвейер работает не более 10 % общего времени, а стоимость преобразователя частоты достаточно велика. В этом случае применение преобразователя частоты для получения пониженной скорости вращения двигателя является экономически не целесообразным. Применение двухскоростного двигателя с двумя обмотками на статоре приводит к значительному удорожанию двигателя. Что также экономически не целесообразно [1].

Цель работы – определить характеристики асинхронного привода при квазичастотном управлении.

Описание устройства. Более перспективным представляется принцип регулирования скорости привода предложенный в [2], такой

способ в литературе получил название квазичастотного. Схема включения двигателя по такому способу приведена на рис. 1.

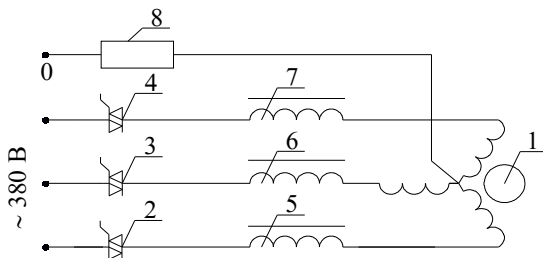


Рис. 1 – Общая схема включения асинхронного двигателя для получения скорости $n_n/5$.

В этом случае напряжение формируется ключами 2, 3, 4 подключаемых в каждую фазу обмотки двигателя: в течение пяти полупериодов напряжения сети пропускаются две полуволны одного знака, а в течении пяти следующих полупериодов две волны противоположного знака.

Время включения в разных фазах подбирается так, чтобы получить сдвиг фаз на 120 градусов. График напряжения питающего двигатель по указанной схеме приведен на рис. 2.

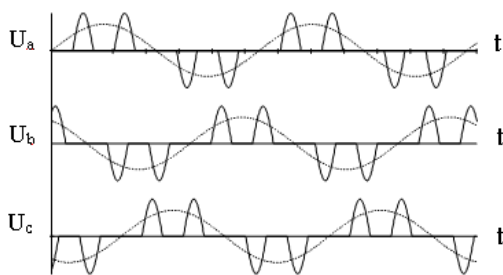


Рис. 2 – График изменения напряжения, питающего двигатель.

Указанная схема позволяет, кроме снижения скорости в 5 раз, осуществить плавный пуск двигателя, для чего достаточно плавно уменьшать угол открытия ключей. При этом напряжение, момент и скорость двигателя будут плавно возрастать, что обеспечит пуск конвейера без динамических ударов. Кроме этого, схема позволяет осуществить экстренное торможение двигателя при заклинивании рабочего органа [3]. При механических перегрузках, ток двигателя начинает расти. В этом случае два ключа, например 3 и 4 открываются в

одном направлении, а ключ 2, закрывается. Постоянная составляющая тока протекает через ключи 3 и 4 фазы обмотки двигателя и сопротивление 5, которое включено в нулевую фазу, осуществляя электродинамическое торможение. Сопротивление 5, ограничивает величину тока до безопасной величины.

Если причиной роста тока стало короткое замыкание в кабеле или обмотке двигателя, то питание по указанной схеме (через ключи и сопротивление в нулевом проводе) не приводит к аварийной ситуации, так как для тока короткого замыкания ключи открыты встречно, а наличие сопротивления в нулевом проводе ограничит ток до безопасной величины.

Для исследований работы двигателя при питании по предлагаемой схеме, была синтезирована математическая модель. Исследования проводились в среде MATLAB R2008b. Модель состоит из системы управления и асинхронного двигателя. Блок схема системы представлена на рис. 3.

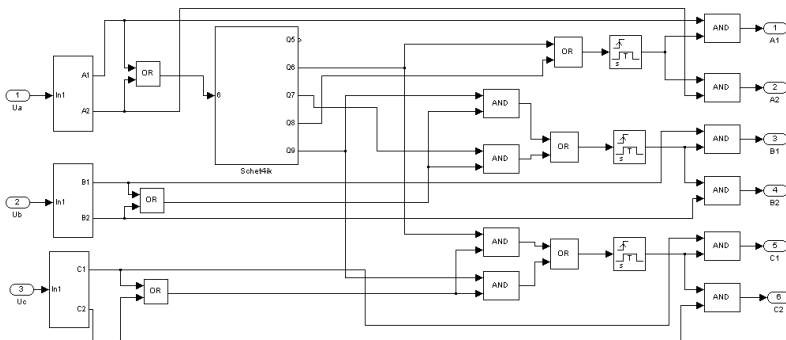


Рис. 3 – Схема управления тиристорами.

Она работает следующим образом. На входы U_a , U_b , U_c поступает сетевое напряжение, которое попадает на блоки контроля прохождения напряжения через ноль. Выходные импульсы фазы А поступают на счетчик который является тактовым. По логической схеме выходные сигналы попадают на соответствующие выходы блока управления.

Математическая модель двигателя синтезирована по параметрам асинхронного двигателя ЭДКОФ 315М4.

Результаты испытаний. С помощью модели рассчитаны пусковые характеристики двигателя при питании от сетевого напряжения и при квазичастотном управлении.

На рис. 4 приведены пусковые характеристики.

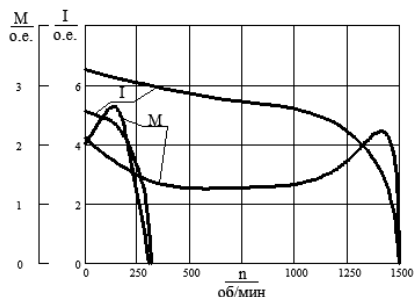


Рис. 4 – Пусковые характеристики.

При работе двигателя с квазичастотным управлением наблюдаются пульсации момента, которые можно снижать, путем включения в силовую цепь последовательно с обмоткой статора индуктивностей. Для оценки их влияния на характеристики были проведены испытания.

На рис. 5 показаны зависимости среднего момента, амплитуды пульсаций и действующего значения тока в начальный момент пуска (сплошные кривые) и при скорости 250 об/мин (пунктирные кривые), которую можно считать за номинальную.

Анализ результатов испытаний. 1. При пуске без индуктивности привод имеет достаточно высокий пусковой момент при более низком пусковом токе. 2. Применение индуктивностей позволяет снизить пульсации момента, но одновременно уменьшается его среднее значение. Так, например, при индуктивности равной 0,5 о.е. средний момент равен 31,49 о.е. а действующее значение тока равно 39,1. Таким образом, привод развивает приемлемую мощность. По габаритам индуктивность (0,5 о.е.) не должна превышать 20 % габаритов двигателя.

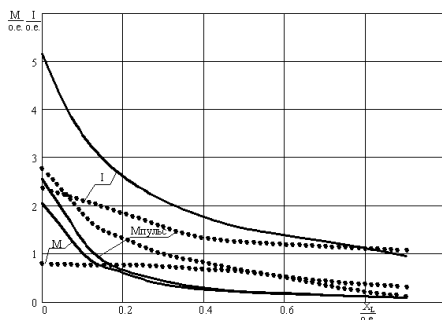


Рис. 5 – Зависимость среднего момента, пульсации момента, и действующего значения тока, от величины индуктивностей.

Выводы: 1. В процессе испытаний подтверждена работоспособность привода с квазичастотным управлением. 2. Привод с предложенной системой управления будет иметь приемлемые характеристики. 3. В дальнейших исследованиях необходимо определить оптимальные параметры системы управления.

Список литературы: 1. Худобин К.В., Цодик И.А. Исследование асинхронного двигателя в тиристорно управляемом приводе скребкового конвейера. Материали Міжнародної науково-технічної конференції м. Севастополь, 2012р. – С.94-95 2. Пат. 71485 України, МПК(2012.01) H02P 7/00. Багатошвидкісний асинхронний електропривід / І.А. Цодік, О.В.Бакаєв, К.В.Худобін. – № u2012 00918; Заявл. 30.01.2012; Опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13. 3. Пат. 71487 України, МПК(2012.01) H02P 7/00. Багатошвидкісний асинхронний електропривід / І.А. Цодік, О.В.Бакаєв, К.В.Худобін. – № u201200920; Заявл. 30.01.2012; Опубл. 10.07.2012, Бюл. № 21 4. Цодик И.А., Худобин К.В. Динамическая модель асинхронного двигателя на основе численно-полевых расчетов. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції м. Севастополь, 2012 р. – С.85-86

Поступила в редколлегию 24.10.2012



Цодик Игорь Абрамович, канд. техн. наук, доцент кафедры "Электрические машины и аппараты" ДонГТУ. Защитил диплом инженера в ДонГТУ по специальности "Электрические машины и аппараты" в 1972г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1983 г.



Худобин Константин Викторович, аспирант кафедры электрических машин и аппаратов "ЭМА", Донбасского Государственного технического университета. Защитил диплом магистра в ДонГТУ по специальности "Электрические машины и аппараты" в 2010 г.

А.И. ВАЖИНСКИЙ, аспирант кафедры ЭАПУ ДонНТУ, Донецк

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ
ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Приведены результаты разработки программного обеспечения комплекса весового дозирования. Основой разработки стала предложенная методика идентификации объекта управления. Дано описание измерительного устройства наличия материала с адаптивной настройкой.

Ключевые слова: датчик, весовое дозирование, система управления, идентификация.

Наведено результати розробки програмного забезпечення комплексу вагового дозування. Основою розробки стала запропонована методика ідентифікації об'єкта управління. Дано опис вимірювального пристрою наявності матеріалу з адаптивною настройкою.

Ключові слова: датчик, вагове дозування, система керування, ідентифікація

The results of the weight dosing complex software development are described. Proposed identification method has become a basis for complex software. Also there is description of an adaptive setting measuring device in the paper.

Keywords: sensor, weight dosing, control system, identification.

Введение. Работа подавляющего большинства систем управления на предприятиях может быть существенно улучшена за счет оптимизации настройки регуляторов. С этой целью разрабатываются функции автоматической настройки САУ. Для определения параметров модели необходимо задаваться структурой модели. Для объекта без самовыравнивания производятся дополнительные расчеты [1].

Для процесса агломерации важно соблюдение весового соотношения всех компонентов шихты для обеспечения стабильного химического состава. Руда в данном процессе является основным компонентом, поэтому ставится задача качественного управления и регулирования процессом дозирования этого компонента.

Метод площадей (метод Симою М.П.) [2, 3] позволяет определить передаточную функцию модели объекта по кривой разгона.

Динамические свойства объекта аппроксимируются моделью следующего вида:

$$\overline{W}_M^{-1}(s) = \frac{1}{\overline{W}_M(s)} = \frac{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}{1 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3}, \quad (1)$$

где K – коэффициент усиления; τ – время запаздывания (запаздывание); a_i, b_i – коэффициенты передаточной функции

$$\overline{W}_M^{-1}(s) = \frac{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}{1 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3} = 1 + S_1 s + S_2 s^2 + S_3 s^3, \quad (2)$$

нормированная передаточная функция с коэффициентом усиления равным единице

$$K = \overline{W}_M(0) = 1. \quad (3)$$

Основной задачей является определение коэффициентов a_i, b_i передаточной функции методом, предложенным М.П. Симою.

Для определения параметров модели (1) кривая разгона преобразуется к расчетной. Процедура приведения кривой разгона к расчетной зависит от динамических свойств объекта. Для нас представляет интерес случай объекта регулирования с самовыравниванием (пропорциональный).

На рис. 1 приведена кривая разгона тарельчатого питателя комплекса весового дозирования, полученная экспериментально.

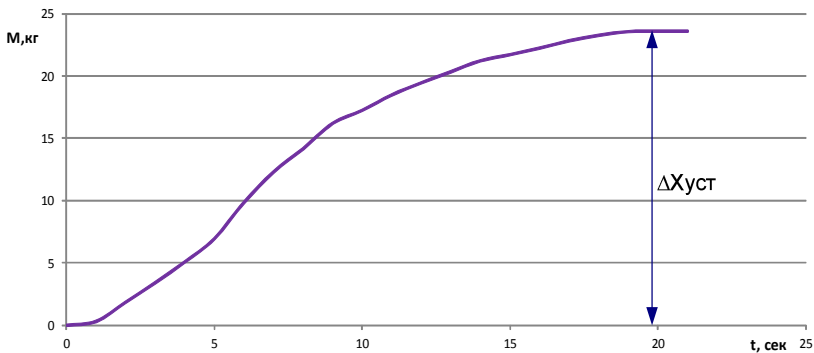


Рис. 1 – Результаты экспериментального снятия кривой разгона объекта.

Для расчета параметров модели методом площадей целесообразно ввести нормированную кривую разгона (переходную характеристику), определяемую формулой

$$\bar{h}(t) = \frac{\Delta y(t)}{\Delta y_{\text{уст}}} . \quad (4)$$

Переходную кривую $\bar{h}(t)$ можно рассматривать как реакцию динамического звена с нормированной передаточной функцией вида (5)

$$\bar{W}_M(s) = \frac{1 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3} \quad (5)$$

Тогда изображение по Лапласу $\bar{h}(t)$ можно записать как (6)

$$\bar{H}(s) = L\{\bar{h}(t)\} = \bar{W}_M(s) \frac{1}{s} . \quad (6)$$

Параметры a_i , b_i модели (5) могут быть определены по нормированной кривой разгона. Рассмотрим инверсную передаточную функцию модели

$$\bar{W}_M^{-1}(s) = \frac{1}{\bar{W}_M(s)} = \frac{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}{1 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3} . \quad (7)$$

Разложим $\bar{W}_M^{-1}(s)$ в ряд Тейлора в точке $s=0$:

$$\bar{W}_M^{-1}(s) = \frac{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}{1 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3} = 1 + S_1 s + S_2 s^2 + S_3 s^3 , \quad (8)$$

где $\bar{W}_M^{-1}(0) = S_0 = 1$.

Коэффициенты разложения S_k названы М.П. Симою площадями. При известных площадях S_k легко определяются коэффициенты передаточной функции a_i , b_i .

Для этого умножим обе части равенства (8) на знаменатель $\bar{W}_M^{-1}(s)$. В результате получим

$$(1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3) = (1 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3) (1 + S_1 s + S_2 s^2 + S_3 s^3) . \quad (9)$$

Для определения коэффициентов a_i , b_i необходимо $N = m + n$ уравнений и такое же количество площадей. В рассматриваемом случае:

$$\bar{W}_M(s) = \frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a^n} , \quad m = 0 . \quad (10)$$

Необходимо иметь в виду, что все используемые площади должны быть положительными. В противном случае модель не устойчива (критерий Стодолы).

$$\overline{W}_M(s) = \frac{b_1 s + 1}{1 + a_1 s + a_2 s^2}, \quad n = 2, m = 1. \quad (11)$$

Для определения 3-х коэффициентов необходимо 3 уравнения. Система (9) принимает вид:

$$\begin{aligned} a_1 &= S_1 + b_1; \\ a_2 &= S_2 + b_1 S_1; \\ 0 &= S_3 + b_1 S_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Из последнего уравнения системы (12) находим $b_1 = -S_1/S_2$, подставляя в первые два находим a_1 и a_2 .

$$\overline{W}_M(s) = \frac{b_1 s + 1}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}, \quad n = 3, m = 1; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= S_1 + b_1; \\ a_3 &= S_3 + S_2 b_1; \\ a_2 &= S_2 + S_1 b_1; \\ 0 &= S_4 + S_3 b_1. \end{aligned} \quad (14)$$

Введем в рассмотрение вспомогательную функцию $\varphi(t)$, определяемую формулой:

$$\varphi(t) = 1 - \overline{h}(t). \quad (15)$$

Определим изображение по Лапласу $\varphi(t)$.

$$\Phi(s) = L\{\varphi(t)\} = L\{1 - \overline{h}(t)\} = L\{1\} - L\{\overline{h}(t)\} = \frac{1}{s} - \overline{W}_M(s) \frac{1}{s} = \frac{1 - \overline{W}_M(s)}{s} \quad (16)$$

Разложим $\Phi(s)$ в ряд по степеням s в точке $s=0$:

$$\Phi(s) = \mu_0 + \mu_1 s + \mu_2 s^2 + \dots + \mu_k s^k = \sum_{k=0}^{\infty} \mu_k s^k, \quad (17)$$

где $\mu_k = \frac{1}{k!} \Phi^{(k)}(0)$.

Коэффициенты разложения μ_k носят название моментов вспомогательной функции $\varphi(t)$ и могут быть вычислены непосредственно по графику $\varphi(t)$.

Установим связь моментов μ_k с функцией $\varphi(t)$. Запишем формулу прямого преобразования Лапласа для $\varphi(t)$:

$$\Phi(s) = \int_0^{\infty} \varphi(t) e^{-st} dt \quad (18)$$

Подставив значение $s=0$ и сравнивая полученные выражения с формулами для моментов, получим:

$$\begin{aligned}\mu_0 &= \int_0^{\infty} \varphi(t) dt; \\ \mu_1 &= \int_0^{\infty} (-t) \varphi(t) dt; \\ \mu_2 &= \frac{1}{2!} \int_0^{\infty} (-t)^2 \varphi(t) dt; \\ \mu_k &= \frac{1}{k!} \int_0^{\infty} (-t)^k \varphi(t) dt.\end{aligned}\tag{19}$$

Как видно из формул (19) моменты μ_k могут быть вычислены по известной функции $\varphi(t)$. Установим связь между моментами μ_k и площадями S_k .

Преобразуем формулу (19) в $s\Phi(s) = 1 - \overline{W}_M(s)$ или $\overline{W}_M(s) = 1 - s\Phi(s)$.

Отсюда следует, что

$$[1 - s\Phi(s)] \frac{1}{\overline{W}_M(s)} = 1.\tag{20}$$

Далее

$$\left[1 - s(\mu_0 + \mu_1 s + \mu_2 s^2 + \mu_3 s^3)\right] \left[1 + S_1 s + S_2 s^2 + S_3 s^3\right] = 1,$$

или

$$\left[1 - \mu_0 s - \mu_1 s^2 + \mu_2 s^3\right] \left[1 + S_1 s + S_2 s^2 + S_3 s^3\right] = 1.\tag{21}$$

Умножая и приводя подобные члены, получим

$$1 + (S_1 - \mu_0)s + (S_2 - \mu_0 S_1 - \mu_1)s^2 = 1.\tag{22}$$

Из выражения (22) следует:

$$\begin{aligned}S_1 - \mu_0 &= 0; \\ S_2 - \mu_0 S_1 - \mu_1 &= 0.\end{aligned}\tag{23}$$

Из последних уравнений получаем рекуррентные формулы для вычисления площадей:

$$\begin{aligned}S_1 &= \mu_0; \\ S_2 &= \mu_0 S_1 + \mu_1.\end{aligned}\tag{24}$$

Таким образом, алгоритм оценки параметров модели может быть записан следующим образом,

$$\begin{aligned}\mu_0 &= \int_0^{\infty} \varphi(t) dt; \\ \mu_1 &= \int_0^{\infty} (-t) \varphi(t) dt; \\ \mu_2 &= \frac{1}{2!} \int_0^{\infty} (-t)^2 \varphi(t) dt; \\ \mu_k &= \frac{1}{k!} \int_0^{\infty} (-t)^k \varphi(t) dt.\end{aligned}\tag{25}$$

где $\varphi(t) = 1 - \frac{\Delta y(t)}{\Delta y_{уст}}$;

$$\begin{aligned}S_1 &= \mu_0; \\ S_2 &= \mu_0 S_1 + \mu_1.\end{aligned}\tag{26}$$

и

$$\begin{aligned}a_1 &= b_1 + S_1; \\ a_2 &= b_2 + b_1 S_1 + S_2; \\ a_3 &= b_3 + b_2 S_1 + b_1 S_2 + S_3.\end{aligned}\tag{27}$$

Используя метод трапеций, проводится замена бесконечного предела интегрирования конечным:

$$\mu_k = \frac{1}{k!} \int_0^{T_n} (-t)^k \varphi(t) dt.\tag{28}$$

По найденным параметрам модели строится расчетная переходная функция и сравнивается с реальной функцией. Рис. 2 дает представление об улучшении качества управления объектом в результате применения программного комплекса.



Рис. 2 – Графики переходных процессов в системе управления.

Сложные производственные процессы характеризуются случайным характером возмущений. Не исключением является и операции подготовки шихты. Вопросы применения автоматических систем для сложного объекта, которым является системы весодозирования, характеризуются необходимостью наличия современного программного и аппаратного обеспечения [4]. Одним из важнейших этапов подготовки шихтовых материалов является перемешивание и транспортировка. Задачи бесперебойного снабжения, качественного смешивания и дозирования могут иметь решение только в случае применения современных измерительных устройств наличия материала. В настоящее время для контроля уровня и наличия материалов в системах весового дозирования используются датчики СУ-2, БКС.

Электронный блок сигнализатора уровня материала собран на аналоговой электронной базе (операционные усилители, транзисторы, стабилитроны), которая управляет электромагнитным реле.

Эксплуатация датчиков наличия материалов вышеизложенной элементной базы выявила следующие недостатки:

- необходимость в частой подстройке порога срабатывания;
- частые ложные срабатывания;
- аналоговая электроника выходит из строя, вследствие подгорания контактов электромагнитного реле.

Все вышеизложенное обусловило необходимость разработки измерительного устройства контроля наличия материалов на новой технологической и элементной базе [5].

В новом сигнализаторе датчик наличия материала (электрод) остается прежним, а изменениям подвергается электронный блок. Блок собирается на современной элементной базе, основой является 8 битный микроконтроллер фирмы ATMEL серии ATTINY 2313. Вместо электромагнитного реле используется оптопара серии АОТ, которая способна коммутировать напряжение до 200 вольт и ток до 2 А.

Датчик наличия сыпучих материалов используется в системе автоматической загрузки бункеров. В схеме применяемых сигнализаторов уровня материала на входе применялся операционный усилитель с достаточно высоким коэффициентом усиления, что приводило к частым ложным срабатываниям и остановке технологического процесса. Поэтому на входе сигнализатора уровня материала вместо операционного усилителя предлагается использовать оптопару серии EL 817, с меньшим коэффициентом усиления. На рис. 3 представлена структурная схема предлагаемого электронного блока датчика контроля сыпучих материалов.



Рис. 3 – Схема контроля наличия материала на транспортной ленте.

На входе прибора был установлен оптрон (EL817) с низким коэффициентом усиления сигнала по напряжению. Входная цепь заменена двумя биполярными транзисторами (КТ361), соединёнными по схеме эмиттерного повторителя, что обеспечивает большее усиление по напряжению и увеличивает диапазон срабатывания прибора в зависимости от электрического сопротивления контролируемого материала. Принципиальная схема прибора приведена на рис. 4. В таблице приведены конкурентные преимущества разработанного сигнализатора.

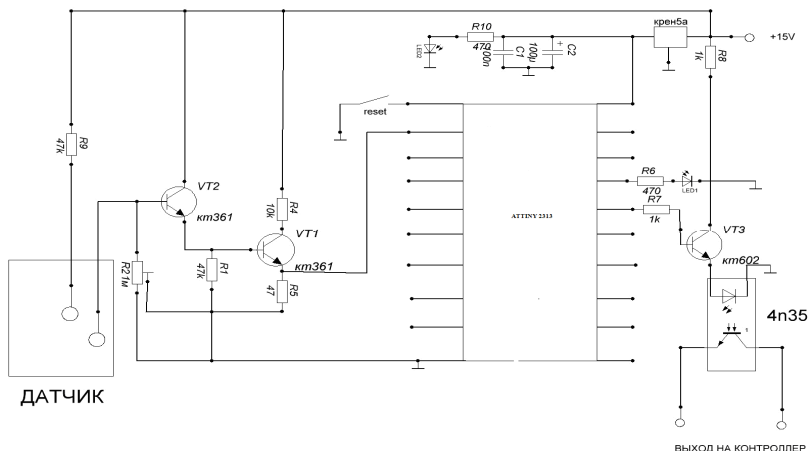


Рис. 4 – Принципиальная схема датчика контроля наличия материала.

Таблица – Конкурентные преимущества разработанного сигнализатора

СУ2	СУ3
Высокая цена	Низкая цена
Электромагнитное реле	Коммутация происходит без искры, контакты не подгорают
Сложная схема	Относительно простая схема
Нет информации для ремонта прибора	Документация по ремонту прибора предоставляется.

Выводы. В результате проведенных исследований:

1. Разработана математическая модель объекта управления – системы дозирования сыпучих материалов, учитывающая влияние транспортного запаздывания управляющих воздействий.
2. Предложена система управления процессом дозирования, алгоритм которой позволяет выполнять управление, основываясь на прогнозировании будущего состояния объекта в течение времени запаздывания.
3. Создано измерительное устройство – датчик наличия сыпучих материалов, позволяющий проводить адаптивную настройку определения различных материалов.

Список литературы: 1. Астахов А.Г. Автоматизация процессов окускования железных руд и концентратов / А.Г. Астахов, Н.В. Федоровский. – К.: Техника, 1965. – 230 с. 2. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.:

Мир, 1984. – 541 с. **3.** Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования / М.П. Симою // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 6. – С. 514-527. **4.** Жуков С.Ф. Разработка комплекса аппаратных и программных средств автоматического управления агломерационным производством / Жуков С.Ф., Важинский А.И. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2009. – № 9. – С. 9-10. **5.** Пат. на корисну модель № 71202 Україна, МПК(2012) G01F23/00. Сигналізатор наявності сипких матеріалів / А.И. Важинский, С.Ф. Жуков, Р.М. Кожанов // Заявлено 02.12.2011; Опубл. 10.07.12, Бюл. №13.

Поступила в редколлегию 29.11.2012

К.В. ДУБОВЕНКО, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедри, МНАУ, Миколаїв

Д.О. ЗАХАРОВ, зав. лабораторії, МНАУ, Миколаїв

ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ЗЕРНОВОЇ ПРОДУКЦІЇ ІМПУЛЬСНИМ КОРОННИМ РОЗРЯДОМ

На основі аналізу електричного поля в заповненій зерном камері та іонізації її об'єму обґрунтовано умови розвитку коронних розрядів в зерновій масі. З їх урахуванням розроблено резонансний генератор високих напруг і виконано обробку контрольних партій зерна, зараженого грибовою культурою. З використанням цифрової мікроскопії зафіксовано руйнування структури грибкових утворень.

Ключові слова: імпульсний коронний розряд, знезараження, зернова продукція.

На основе численного анализа электрического поля в заполненной зерном камере и ионизации ее объема обоснованы условия развития коронных разрядов в зерновой массе. С их учетом разработан резонансный генератор высоких напряжений и выполнена обработка контрольных партий зерна, зараженного грибковой культурой. С использованием цифровой микроскопии зафиксировано разрушение структуры грибковых образований.

Ключевые слова: импульсный коронный разряд, обеззараживание, зерновая продукция

On the base of the electric field analysis in the chamber filled with grain, and its volume ionization the conditions of corona discharge in the bulk grain mass are proved. With due regard for them the resonant high voltage generator is created and control processing of grain parties, contaminated with fungal culture, is executed. With the use of digital microscopy the destruction of fungal culture is registered.

Keywords: pulsed corona discharge, disinfection, grain products.

Вступ. Розробка сучасних електротехнологій для збереження зернових ресурсів країни є пріоритетним завданням, що за своєю важливістю відповідає вимогам державного рівня. Відомо, що близько 85 % збудників найбільш небезпечних хвороб злакових культур є грибовими мікроорганізмами, з них майже 80 % є токсикогенами [1]. Істотними недоліками методів хімічної дезинсекції, дезинфекції і детоксикації зернової продукції є те, що вони небезпечні для персоналу, вимагають тривалого часу знезараження з вимушеною зупинкою підприємства. Чималі матеріальні витрати потрібні й на виконання заходів щодо придбання, транспортування і зберігання дезінсектантів, інсектицидів

© Дубовенко К.В., Захаров Д.О., 2012

і фунгіцидів. Після фумігації в зерні залишаються отруйні речовини, вірогідність попадання яких в їжу людини лишається високою, одночасно відбувається забруднення навколишнього середовища. Слід зазначити, що щорічно всі великі елеватори, хлібоприймальні пункти, млини, круп'яні і комбікормові заводи також піддаються знезараженню отруйними газами.

У зв'язку з цим особливе значення набуває спрямування досліджень на створення сучасних засобів боротьби з грибовою мікрофлорою продовольчого зерна, що задовольняють вимогам підвищеної екологічної і токсикологічної безпеки. До таких засобів, безумовно, можна віднести методи знезараження продовольчого зерна енергією електричного поля високої напруженості [2].

Роботи [2, 3] присвячені розробці устаткування та впровадженню у виробництво обробки зерна коронним розрядом в постійному електричному полі. Запропонований метод є екологічно чистим, оскільки при використанні озону в середовищі, яке обробляється, не залишається хімічно небезпечних продуктів розкладу. Для порівняння слід зазначити, що при використанні отрутохімікатів дегазація триває кілька діб. Проте в теперішній час є актуальною мінімізація втрат енергії на обробку зернової продукції коронним розрядом в промислових масштабах та підвищення безпеки технічної експлуатації технологічних установок, призначених для такої обробки. В цьому сенсі є вельми перспективним застосування імпульсних коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсів (порядку сотень тисяч Герц).

Мета, завдання дослідження. В даній роботі аналізуються умови створення імпульсних коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсів в об'ємах розрядних камер та його застосування для знезараження зернової продукції.

Теоретичний аналіз умов реалізації імпульсних коронних розрядів в об'ємі зернової маси. Дослідження, виконані в [3-5], свідчать про те, що електрофізичні властивості зернової маси (питома електропровідність, відносна діелектрична проникність) значною мірою залежать від температури та вологості. Ці результати є передумовами для аналізу характеристик електричного поля в об'ємі зернової маси. Відомо, що в залежності від часу дії імпульсної або високочастотної напруги електричне поле формується струмом провідності або струмом зміщення відносно часу релаксації середовища [6]. Час релаксації середовища визначається співвідношенням (1)

$$\tau = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0}{\sigma}, \quad (1)$$

де ε_r – відносна діелектрична проникність середовища; ε_0 – електрична стала; σ – питома електропровідність середовища.

В діапазоні зміни вологості зерна 12...34 % і температури 16...35 °С питома електропровідність зернової маси змінюється від $10 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$ до $12 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$, а відносна діелектрична проникність відповідно знаходиться в межах від 2 до 22 одиниць. За таких умов час релаксації середовища є на два порядки меншим, ніж тривалість імпульсів або період коливань напруги частотою 500 кГц і, таким чином, слід вважати, що електричне поле в області камери, заповненої зерновою масою формується струмом зміщення.

З урахуванням цього проблему теорії електричного поля можна сформулювати як знаходження функції потенціалу, що задовольняє еліптичному рівнянню в часткових похідних другого порядку (2) в декартовій системі координат

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

де ϕ – електричний потенціал; $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ – абсолютна діелектрична проникність; x, y – декартові координати.

Умови формування коронного розряду в будь-якому міжелектро-дному проміжку визначаються неоднорідним розподілом в ньому напруженості електричного поля. За відомим розподілом потенціалу вектор напруженості електричного поля E та його модуль визначаються з використанням рівнянь (3), (4).

$$\vec{E} = -\text{grad} \phi = - \left(\vec{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$|E| = \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

Для аналізу розподілу характеристик електричного поля розмір розрядної камери набагато перевищує розмір зернини. Нульові граничні умови за електричним потенціалом задані на зовнішній граничній області, розташованій настільки далеко від стінок камери, що не впливали на розподіл напруженості електричного поля в камері.

Для розв'язку поставленого завдання застосовано чисельний метод верхньої релаксації [7]. Реалізоване на основі цього методу програмне забезпечення в попередніх роботах успішно використовувалося для аналізу роботи різних вузлів високовольтного устаткування [8-10].

Результати моделювання просторового розподілу характеристик електричного поля в об'ємі розрядної камери між високопотенціальним і низькопотенціальним електродами, отримані за допомогою метода верхньої релаксації, співпадають з результатами моделювання, виконаними з використанням об'єктно-орієнтованого пакету FEMM 4.2 і наведені на рис. 1. Під час розрахунків кінцево-елементна сітка містила 9722 вузли та складалася з 19055 елементів.

На рис. 1,а у відносних одиницях зображено розподіл напруженості електричного поля в об'ємі розрядної камери, заповненої вологим зерном (вологість зерна $\chi = 34\%$, з відносною діелектричною проникністю зернини $\epsilon = 22$) в момент максимуму напруги. Чітко виражені зони підвищеної напруженості поля в областях великої крутизни обрисів зернин. На рис. 1,а наведено два спрощених випадки, коли зернини торкаються одна іншої (знизу), і коли між гострими кінцями зернин існує невеликий повітряний проміжок (зверху). Результати чисельних розрахунків свідчать про те, що в останньому випадку локальні зони підвищеної напруженості поля займають значно більший об'єм, а напруженість електричного поля в цих локальних зонах є в 5...6 разів більшою, ніж поза їх межами. Таким чином, наявність зон підвищеної напруженості електричного поля свідчить про реальну можливість створення системи коронних розрядів в об'ємі середовища, які можуть ефективно виконувати функції бактерицидного знезараження зернової продукції в усьому об'ємі бункера з встановленими електродами за рахунок генерації озону. В процесі сушіння зерна його вологість зменшується. Це означає зменшення відносної діелектричної проникності середовища. На рис. 1,б наведено результати розрахунків розподілу напруженості електричного поля в міжелектродному проміжку для іншого випадку сухого зерна вологістю $\chi = 12\%$ з відносною діелектричною проникністю зернини $\epsilon = 2$.

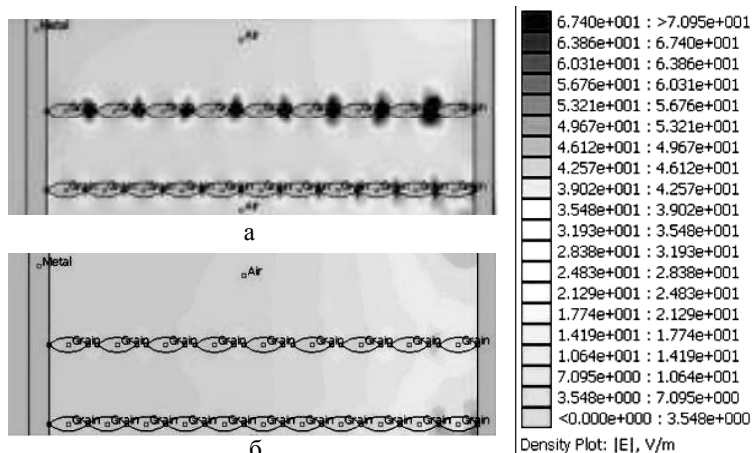


Рис. 1 – Розподіл напруженості електричного поля в розрядній камері:
а – вологе зерно; б – сухе зерно

Відомо, що шорсткість поверхні зернин впливає на розподіл електричного поля. Аналіз експериментальних даних з визначення шорсткості матеріалів, опублікованих у [11] та отриманих в результаті вимірювань, виконаних у цій роботі, свідчить про те, що у багатьох характерних випадках вони з припустимою похибкою можуть бути апроксимовані залежностями

$$f(h) = -kh + 1, \text{ при } 0 \leq h \leq h_1, \quad (5)$$

$$f(h) = v/h - u, \text{ при } h_1 \leq h \leq h_m, \quad (6)$$

$$k = [1 - f(h_1)]/h_1, \quad v = f(h_1) / \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_m} \right), \quad u = v/h_m, \quad (7)$$

де $h_1 < h < h_m$ – відстань збурення поля уздовж осі мікровиступу.

Весь простір міжзернинного проміжку від вершини виступу до протилежної зернини можна умовно вважати таким, що складається з двох частин. Перша частина відповідає області поля, збуреної мікрориступом, а друга – зоні, де мікрориступ не впливає на розподіл напруженості електричного поля. Якщо мікрориступи знаходяться на такій відстані, що збурення поля одним з них не впливає на розподіл поля біля іншого, і за формою їх з достатньою точністю можна моделювати напівеліпсоїдом, то напруженість поля уздовж його осі у газовому середовищі визначається, як показано в [12], співвідношенням

$$E_z(x) = E \left[\left(1 - \frac{\operatorname{arth}(c/x) - c/x}{\operatorname{arth}(c/h) - c/h} \right) + \frac{1}{(\operatorname{arth}(c/h) - c/h)(x^2/c^2 - 1)x/c} \right], \quad (8)$$

де c – половина відстані між фокусами еліпсоїду.

Відомо, що пробій проміжків у газі може відбуватися як за таунсендовським, так і за стримерним механізмом. В алгоритмі, що застосовано, враховано обидві можливості розвитку пробою в залежності від характеристик газової ізоляції, матеріалу електродів та розподілу напруженості електричного поля [10]. Таунсендівському механізмові відповідає багатолавинний процес, коли до розмноження носіїв заряду залучено усю поверхню катоду та весь об'єм газу між катодом та анодом. У процесі генерації нових електронних лавин під час їх руху від катоду до аноду утворюється канал розряду. Критерієм багатолавинного пробою [14] є співвідношення

$$\int_0^d (\alpha_j(x) - \eta_j(x)) dx \geq \ln \left(\frac{\alpha(d) - \eta(d)}{\alpha(d) \cdot \gamma} \right) = K, \quad (9)$$

де d – довжина шляху лавини між електродами; α_j – значення першого іонізаційного коефіцієнту Таунсенда при виході лавини з j -ої ділянки катоду; x – відстань, що пройшла лавина у полі ($0 \leq x \leq d$); η_j – коефіцієнт прилипання; γ – другий іонізаційний коефіцієнт Таунсенда.

Ймовірність пробою q_j , що розвивається з S_j ділянки електродної поверхні, обчислювалася з урахуванням наступного. При появі вільного електрону біля поверхні електроду ймовірність того, що він опиниться саме біля S_j , дорівнюватиме відношенню S_j/S_0 . Але процес утворення лавин від цього електрону може бути ефективним і призвести до пробою лише тоді, коли електрон не просто буде на цій ділянці, а буде саме біля мікровиступів з висотою, більшою за $h_{\min}$, тобто у полі, збуреному мікровиступами з найменшою висотою, при якій для заданої напруги справджуються нерівності (8), (9). При висотах, більших за $h_{\min}$, цей процес буде найбільш ефективним. Загальна площа мікровиступів ділянки j з висотою, більшою за $h_{\min}$, є лише частиною площі S_j . Тому вона менша за S_j і обчислюється за характеристикою шорсткості електродів (4)-(8). Це означає, що

$$q_j(U) = f(h) = \frac{S_{h_{\min}}}{S_0}, \quad (10)$$

В математичній моделі аналізу розвитку високочастотного коронного розряду необхідно врахувати швидкість зміни напруги на електродах.

Якщо $U=U(t)$, тоді $dt=dU/U'$ та $U'=dU/dt$, і у кінцевому рахунку ймовірність пробую як функцію U можна навести у вигляді [8]

$$Q(U)=1-\exp\left\{-n_0\int_{U_0}^U\sum_{j=1}^N S_j\int_0^{x_{\min j}} g_j dx\cdot\frac{q_j(U)}{U_T}dU\right\}, \quad (11)$$

де U_0 – значення напруги у момент t_0 .

Слід зауважити, що при обраних в результаті моделювання геометричних розмірах камери та електродної системи, значення напруженості електричного поля не перевищують значення напруженості пробую міжелектродного проміжку, але є достатніми для виникнення коронних розрядів.

Розрахункові залежності ймовірності пробую міжелектродного проміжку розрядної камери від напруги, отримані з використанням зазначеного підходу, наведені на рис. 2 для різних значень вологості зернової маси, що варіювалися в діапазоні від 12 до 34 відсотків. Моделювання виконано для розрядної камери з внутрішнім радіусом 60 мм і внутрішнім електродом радіусом 2 мм. Густина насипної зернової маси, що визначає середню щільність просторового розташування зернин, мала характерне значення $1,1\cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$. Умови формування коронного розряду в будь-якому міжелектродному проміжку визначаються неоднорідним розподілом в ньому напруженості електричного поля. За граничну напругу коронного розряду згідно цим кривим слід приймати максимальні значення напруги, для яких ймовірність електричного пробую розрядної камери ще дорівнює нулю (точки U_1 , U_2 , U_3 та U_4 на рис. 2).

В розрахунках залежності ймовірності пробую розрядної камери, заповненої зерновою масою, від напруги враховано залежність розподілу в ній відносної діелектричної проникності від вологості та температури, яка збільшується із підвищенням їх значень. Цей вплив в певній мірі компенсується підвищенням електричної міцності зволоженого повітря, що заповнює міжзернинний простір камери. Таке підвищення обумовлено збільшенням електронегативного впливу газу з підвищеною концентрацією полярних молекул води, що враховано в математичній моделі значенням коефіцієнту прилипання η в (11).

Експериментальні дослідження. На основі виконаного аналізу умов розвитку імпульсних коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсі в об'ємі зернової маси обґрунтована можливість їх створення для реалізації процесу бактерицидного та інсектицидного знезараження зернової продукції. Це обумовило необхідність проведення експериментальних досліджень і перевірки можливості

створення імпульсних коронних розрядів в об'ємі зернової маси.

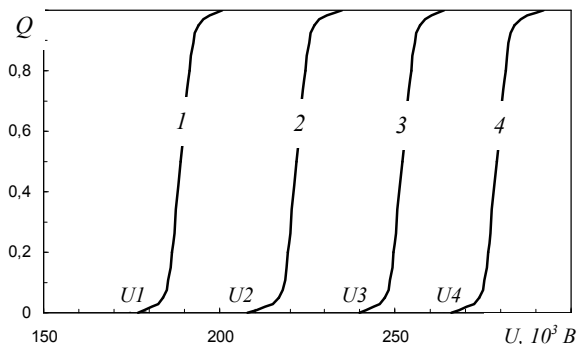


Рис. 2 – Розрахункові залежності ймовірності пробую міжелектродного проміжку розрядної камери від напруги для різних значень вологості χ зернової маси. Криві: 1 – $\chi = 33\%$; 2 – $\chi = 26\%$; 3 – $\chi = 19\%$; 4 – $\chi = 12\%$.

З цією метою була розроблена експериментальна установка для генерації імпульсних коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсів, принцип дії якої заснований на резонансі первинного і вторинного кіл трансформатора. Схема електрична принципова установки наведена на рис. 3.

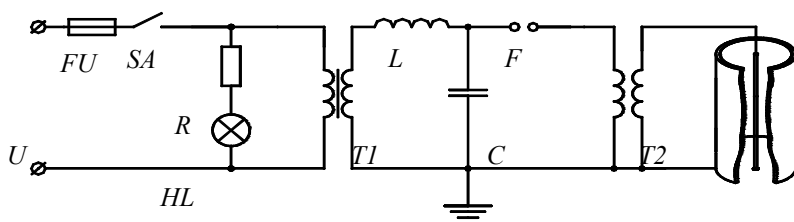


Рис. 3 – Схема електрична принципова силової частини установки для генерації імпульсних коронних розрядів.

Установка живиться від мережі 220 В і споживає потужність 120 Вт. Трансформатор $T1$ підвищує напругу мережі до діючого значення 10 кВ на виході вторинної обмотки. Вихідна напруга трансформатора контролюється кіловольтметром С196. Згідно схеми конденсатор C ємністю 5 нФ заряджається в коливальному режимі через індуктор струмообмеження індуктивністю 30 мкГн. В результаті пробую повітряного розрядника амплітудним значенням напруги 12...14 кВ конденсатор розряджається на первинну обмотку повітряного трансфор-

матора $T2$, яка утворена п'ятьма витками мідної трубки радіусом 4 мм, навитих у формі усіченого конуса з діаметром першого витка 15 см і діаметром останнього – 35 см. Власна частота контуру розряду конденсатора C на первинну обмотку повітряного трансформатора дорівнює 490 кГц. Вона співпадає з власною частотою вторинного контуру, до складу якого належить вторинна обмотка діаметром 8 см, яка має 510 витків мідного проводу діаметром 0,2 мм, та розподілена ємність осесиметричної розрядної камери діаметром 100 мм з центральним високовольтним стрижневим електродом діаметром 4 мм. Коефіцієнт взаємної індукції обмоток трансформатора $T2$ може регулюється в межах $M = 0,05 \dots 0,15$ зміною висоти первинної обмотки. Зміною M досягається максимальна довжина дуги контрагованого розряду (приблизно 8...9 см) при піднесенні до розрядної камери заземленого електрода з радіусом кривизни робочої поверхні 5 мм. При цьому ж значення взаємної індуктивності обмоток реалізується й найбільш яскраве свічення коронного розряду уздовж всієї поверхні внутрішнього електрода радіусом 2 мм, а також найбільш інтенсивне утворення озону в розрядній камері (рис. 4).

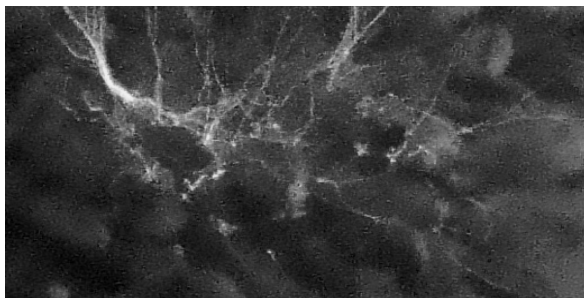


Рис. 4 – Генерація імпульсних коронних розрядів в зерновій масі, що заповнює розрядну камеру.

З використанням даної установки виконано ряд досліджень з обробки збіжжя пшениці. Спочатку було відібрано зернини, незаражені грибковими захворюваннями. На рис. 5,а наведено фотографію поверхні однієї з таких зернин. Після цього для частини зерна було створено сприятливі умови для утворення грибкових колоній (підвищена вологість та температура), що викликало характерне поверхневе зараження зернин токсикогенною грибковою мікрофлорою (рис. 5,б). Заражена зернова маса засипалася в розрядну камеру експериментальної установки і піддавалася дії коронного розряду [4]. Середня тривалість оброб-

ки дослідних зразків зерна складала 10 хвилин. Аналіз результатів обробки виконувався з використанням мікроскопа MICROMED XS-2610 і цифрової фотокамери. Отримані дані (рис. 5,в) свідчать про те, що в результаті впливу коронного розряду з високою частотою проходження імпульсів відбулося практичне повне руйнування структури грибкових утворень.

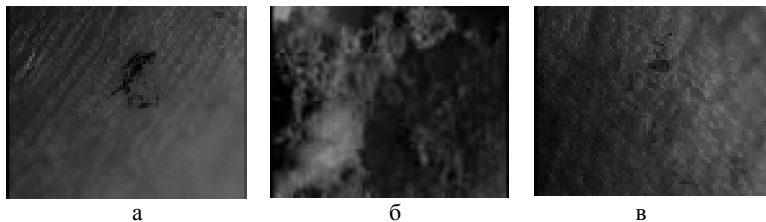


Рис. 5 – Фотографії поверхні зерен (збільшення в 400 разів): а – незаражена зернина; б – зернина, заражена токсинотворними грибами; в – заражена грибами зернина після обробки імпульсним коронним розрядом.

Висновки. Результати даної роботи свідчать про достатню для практичних розрахунків точність оцінки умов утворення коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсів в неоднорідному електричному полі розрядної камери, заповненої гетерогенним середовищем – зерновою масою та про ефективність обробки зараженого зерна коронним розрядом з високою частотою проходження імпульсів (490 кГц).

Список літератури: 1. Берека О.М. Обробка насіння сільськогоспо-дарських культур в електричному полі високої напруги. Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.03 / Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – К., 2010. – 33 с. 2. Берека О.М., Усенко С.М. Дослідження концентрації озону в зерновій масі під дією електричного поля високої напруги // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2010. Вип. 153. – С. 176-182. 3. Берека, О.М. Закономірності зміни питомої електропровідності насінневої маси в електричних полях високої напруги // Аграрна наука і освіта. – 2008. – Т.9, №5/6. – С. 146-148. 4. Nelson S.O. Dielectric Properties of Agricultural Products and Some Applications // Results in Agriculture Engineering., 2008. Vol. 54, N2. – P. 104-112. 5. Serdyuk V.M. Dielectric Study of Bound Water in Grain at Radio and Microwave Frequencies // Progress in Electromagnetics Research (PIER). – 2008. Vol. 84. – P. 379-406. 6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с. 7. Ильин В.П. Численные методы решения задач электрофизики. – М.: Наука, 1985. – 334 с. 8. Дубовенко К.В. Моделирование імовірності пробію газової ізоляції високовольтних пристроїв систем імпульсної електроенергетики / Технічна електроди-

наміка. – 2006. – №2. – С. 15-20. **9.** Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I. The Design, Fabrication and Testing of a Closing Switch for Compact Electrical Discharge Industrial Equipment // 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. Baltimore, Maryland, USA. – 1997. – Vol. 2. – P. 868-874. **10.** Щерба А.А., Дубовенко К.В. Высоковольтные электроразрядные компактные системы / К.: Наукова думка, 2008. – 264 с. **11.** Авруцкий В.А. Влияние шероховатости электродов на пробивные напряжения и их разброс // Журн. техн. физики. – 1973. – Т. 43, № 3. – С. 295. **12.** Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

Надійшла до редколегії 25.10.12



Дубовенко Костянтин Вікторович, доктор технічних наук, доцент. Захистив диплом інженера в Миколаївському кораблебудівному інституті за фахом "Електроустаткування суден" в 1981 р. Захистив дисертацію кандидата технічних наук за фахом "Теоретична електротехніка" в 1988 р. і дисертацію доктора технічних наук за фахом "Електротехнічні комплекси і системи" в 2007 р. в Інституті електродинаміки НАН України. Завідувач кафедри електротехнологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету з 2008 р. Наукові інтереси пов'язані з проблемами фізичних полів електричних розрядів в суцільних середовищах, розробкою електротехнічних комплексів і систем електророзрядної дії різного технологічного призначення.



Захаров Дмитро Олександрович, закінчив Миколаївський національний аграрний університет в 2012 р. за спеціальністю "Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі". Магістрант за фахом "Інженер-дослідник із енергетики сільського господарства". Завідувач лабораторії електротехнологій Миколаївського національного аграрного університету з 2012 р. Наукові інтереси пов'язані з дослідженням впливу імпульсних та високочастотних електромагнітних полів на біологічні середовища, розробкою електротехнічних комплексів і систем електророзрядної дії агропромислового призначення.

Л.Н. МИХАЙЛОВА, канд. техн. наук, ст. преп., ПГАТУ,
г. Каменец-Подольский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ МАСТИТА СВИНЕЙ

Рассмотрен метод определения величины энергии ЭМП и времени для угнетения патогенных микроорганизмов в вымени свиноматок.

Ключевые слова: воспаление молочной железы; энергия ЭМП; патогенные микроорганизмы.

Розглянуто метод визначення величини енергії ЕМП і часу для пригнічення патогенних мікроорганізмів у вимені свиноматок.

Ключові слова: запалення молочної залози; енергія ЕМП; патогенні мікроорганізми.

A method of determining the value of energy of the EMF and time for the suppression of pathogenic microorganisms in the udder of sows is considered.

Keywords: inflammation of the breast, the energy of EMF; pathogenic microorganisms.

Введение. Повышение продуктивности животных и увеличение их поголовья, в том числе и свиней, в значительной мере зависит от своевременного и эффективного лечения. В современных условиях большой экономический ущерб свиноводству наносит болезнь молочной железы у свиней. Основной болезнью молочной железы у свиней, чаще всего, встречается метрит-мастит-агалактия [1].

Как показывает анализ, при воспалении вымени свиноматок поражается до 60 %, а в отдельных случаях до 70..80 % функциональных долей молочной железы. Болезнь вымени свиноматок приводит к гибели до 80 % поросят в первые дни опороса, так как поросята не получают необходимого количества молока.

Анализ предшествующих исследований. В современных условиях для лечения вымени свиноматок используют антибиотики, гормоны и другие химические препараты [1, 2]. Медикаменты, попадая в организм человека через мясо свиней, угнетают иммунитет, поражают печень и другие органы, что приводит к различным заболеваниям и раннему старению.

Поэтому не медикаментозное лечение мастита у свиноматок является актуальной задачей. Литературный анализ показывает, что лечение мастита у свиней возможно на основе применения информационного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона [2].

Воздействие электромагнитного излучения на больное вымя свиней приводит к гибели патогенных микробов, повышает энергетическую активность клеточных мембран, повышает скорость процессов окислительного фосфорилирования и энергетику метаболических процессов, улучшает микроциркуляцию крови и лимфы, активизирует регенеративные процессы в тканях, что приводит к выздоровлению животного и сохранению поросят.

Применение электромагнитных излучений с определенными биотропными параметрами позволит добиться угнетения инфекционных микрорганов в протоках вымени свиноматок и ускорить процесс регенерации поврежденных тканей. Однако определение оптимальных параметров ЭМП для лечения мастита свиноматок требует разработки моделей, которые связывают параметры воздействующего ЭМП и параметры инфекционных микроорганизмов в протоках вымени свиноматок.

Цель статьи. Определить энергетические параметры ЭМП, которые разрушают мембраны патогенных микроорганизмов в вымени свиноматок.

Изложение основного материала. Величину энергии ЭМП и время облучения участков вымени свиноматок для угнетения патогенных микроорганизмов в вымени, используем модель разрушения клеточных мембран патогенных микроорганизмов под действием наведенного критического потенциала [3-6].

Наиболее признанным в настоящее время является механизм разрушения мембран, обусловленный дефектами типа сквозной поры. Предполагают, что в этом случае формирование дефекта сопровождается переориентацией молекул липида, расположенных вблизи границы дефекта, с образованием так называемой инвертированной поры [3].

Максимальная величина энергии для образования сквозной поры в мембране патогенных микроорганизмов от величины критического потенциала, наведенного электромагнитным полем, определяется выражением [3]:

$$W = \frac{\pi \cdot \tilde{\sigma}^2}{\sigma + C \frac{\Phi_{\text{кр}}^2}{2}}, \quad (1)$$

где $\tilde{\sigma}$ – линейное натяжение единицы длины периметра дефекта; σ – поверхностное натяжение мембраны; $C = C_1(\epsilon_B/\epsilon_m - 1)$; ϵ_B – диэлектри-

ческая проницаемость воды на частоте 143 ГГц; ε_m – диэлектрическая проницаемость мембран; $\Phi_{\text{кр}}$ – критический потенциал, приводящий к деструкции мембраны патогенных микроорганизмов.

Величина критического потенциала для разрушения мембраны и критического радиуса поры могут быть определены из выражения:

$$\Phi_{\text{кр}} = \sqrt{0,376 \cdot E_{\text{упр}} \cdot \frac{d^2}{\varepsilon_m \varepsilon_0}}; \quad (2)$$

$$r_{\text{кр}} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sigma + C \frac{\Phi_{\text{кр}}}{2}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{упр}}$ – модуль упругости мембраны; ε_0 – электрическая постоянная; d – толщина мембраны.

Время экспозиции ЭМП для угнетения патогенных микроорганизмов в протоках свиноматки определим из выражения:

$$t = \beta \cdot e^{\frac{W}{K_B \cdot T}}, \quad (4)$$

где β – константа; K_B – постоянная Больцмана; T – температура.

Плотность потока мощности на молочной протоке свиноматки пораженной маститом будет определяться выражением

$$\Pi = \frac{W \cdot K_{\text{ПМ}}}{t}, \quad (5)$$

где $K_{\text{ПМ}}$ – количество патогенных микроорганизмов на квадратном сантиметре пораженного участка. С учетом ослабления падающего ЭМП, которое составляет величину 0,7, мощность источника излучения находим из выражения:

$$P = \frac{W \cdot K_{\text{ПМ}}}{t \cdot 0,7} \cdot S, \quad (6)$$

где S – облучаемая площадь вымени свиноматки.

Приведенные выражения (1)-(6) позволяют вычислить время облучения ЭМП вымени свиноматок, критический потенциал, критический радиус поры в мембране патогенных микроорганизмов и необходимую мощность источника излучения на частоте 142,8 ГГц.

Для расчетов были использованы численные данные, взятые из литературных источников [3-6]:

$$\tilde{\sigma} = 0,5 \cdot 10^{-11}; \quad \sigma = 10^{-3} \text{ Н/м}^2; \quad K_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К};$$

$$T = 300^0 \text{ К}; \quad \varepsilon_B = 6,2; \quad \varepsilon_m = 2,1; \quad E_{\text{упр}} = 6 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2;$$

$$C_1 = 10^{-2} \frac{\Phi}{\text{м}}; \quad d = 10^{-8} \text{ м}; \quad K_{\text{ПМ}} (0,03 \dots 0,04) \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{см}^2}; \quad B = (0,3 \dots 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

В результате численных расчетов было установлено, что критический потенциал ($\phi_{\text{кр}}$) для деструкции мембраны патогенных микроорганизмов в молочных протоках свиноматки должен быть не менее 110 мВ, а величина энергии для образования сквозной поры в мембране не менее $0,7 \cdot 10^{-19}$ Дж. На рис. 1 приведена зависимость критического радиуса ($r_{\text{кр}}$) дефекта мембраны при котором сквозная пора не закрывается.

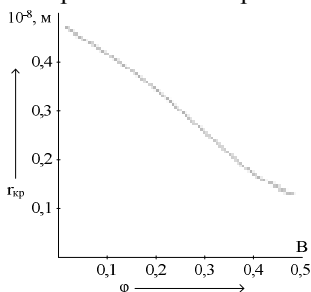


Рис. 1 – Зависимость критического радиуса сквозной поры на мембране патогенных микроорганизмов от наведенного потенциала внешним ЭМП.

Как следует из рис. 1 увеличение наведенного потенциала на мембране приводит к уменьшению максимального значения энергии (W) для образования сквозной поры в мембране. Для критического потенциала 110 В радиус сквозной поры составляет $0,433 \cdot 10^{-8}$ м.

Время экспозиции (t) для угнетения патогенных микроорганизмов в молочных протоках свиноматки ЭМП, полученное из выражения (6), составило 72 с. На рис. 2 приведена зависимость потока мощности ЭМП от величины экспозиции.

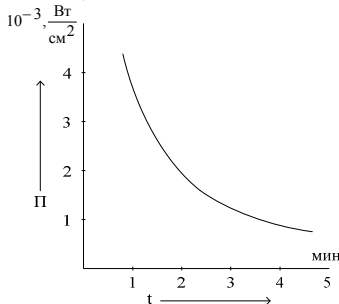


Рис. 2 – Зависимость плотности потока мощности от величины экспозиции (t) при $\phi_{\text{кр}} = 110$ мВ.

Из полученных результатов (рис. 2) следует, что с увеличением экспозиции плотность потока мощности уменьшается, а при экспозиции 72 с она составляет 3,4 мВт/см². Расчеты показали, что мощность источника электромагнитного излучения для лечения мастита свиноматок составляет $\sim 250 \cdot 10^{-3}$ Вт.

Выводы. Для разрушения мембраны патогенных микроорганизмов в вымени свиноматок необходим потенциал на мембране не менее 110 мВ, наведенный внешним электромагнитным источником мощностью 250 мВт.

Лечение мастита свиноматок следует проводить с использованием ЭМП в диапазоне частот 141-143 ГГц, плотностью потока мощности 3,2...3,5 Вт/см² и экспозицию 70...80с.

Список литературы: 1. *Роцин П.Е.* Повышение сохранности и скорости роста в условиях промышленного комплекса / *Роцин П.Е.* // Тез. докл. всесоюзной научной техн. конф. "Профилактика и лечение молодняка с.-х. животных". – М.: 1991. – С. 139-140. 2. *Михайлова Л.Н.* Физиологические особенности мастита свиней и методы его лечения / *Михайлова Л.Н.* // Вісник національного технічного університету "ХПІ" "Нові рішення в сучасних технологіях". – 2011. – № 33 – С. 31-35. 3. *Рубин А.Б.* Биофизика: в 2-х кн.: Учебник для биол. Спец. вузов. Кн. 2 Биофизика клеточных процессов / *А.Б. Рубин.* – М.: Высш. шк., 1987. – 303 с. 4. *Антонов В.Ф.* Липиды и ионная проницаемость мембран / *В.Ф. Антонов.* – М.: Уфа, 1982. – 168 с. 5. *Черенков А.Д.* Изменение мембранного потенциала клеток биологических объектов находящихся во внешних электромагнитных полях. / *А.Д. Черенков, Е.Л. Пиротти* // Весник ХГПУ. – 2000. – Вып. 92. – С. 96-100. 6. *Голант М.Б.* О проблеме резонансного действия когерентных электромагнитных излучений миллиметрового диапазона длин волн на живые организмы / *М.Б. Голант* // Биофизика. – 1989. – Т. 34, № 2. – С. 339-348.

Поступила в редколлегию 25.20.2012

В.Н. СИДОРЕЦ, д-р техн. наук, в.н.с. Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

А.И. БУШМА, канд. техн. наук, н.с. Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

А.М. ЖЕРНОСЕКОВ, канд. техн. наук, с.н.с. Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

Е.Н. ВЕРЕЩАГО, канд. техн. наук, доц., Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ

С помощью обобщенной математической модели динамической дуги исследована динамика радиуса импульсного дугового и лазерно-дугового разрядов. Определено, что скорость изменения радиуса разряда может превышать скорость звука. При переходе через звуковой барьер возникает ударная волна, которая разрушает газовую защиту разряда. Это необходимо учитывать при создании новых импульсных лазерно-дуговых технологий и совершенствовании существующих импульсно-дуговых технологий.

Ключевые слова: математическая модель, импульсный дуговой разряд, лазерно-дуговой разряд.

За допомогою узагальненої математичної моделі динамічної дуги досліджена динаміка радіуса імпульсного дугового та лазерно-дугового розрядів. Визначено, що швидкість зміни радіуса розряду може перевищувати швидкість звука. При переході через звуковий бар'єр виникає ударна хвиля, яка руйнує газовий захист розряду. Це необхідно враховувати при створенні нових імпульсних лазерно-дугових технологій та вдосконаленні існуючих імпульсно-дугових технологій.

Ключові слова: математична модель, імпульсний дуговий розряд, лазерно-дуговий розряд.

Using the generalized mathematical model of the dynamic arc, dynamics of the radius of the pulsed arc discharge and the pulsed laser-arc discharge is investigated. It is determined that the rate of change of the radius of the discharge can exceed the sound speed. In passing through the sound barrier, a shock wave that destroys the gas discharge protection arises. This should be considered when creating new pulsed laser-arc technologies and improving of existing pulsed arc technologies.

Key words: mathematical model, pulsed arc discharge, laser-arc discharge.

Введение. Процесс импульсно-дуговой сварки продолжает оставаться одним из самых перспективных сварочных процессов. Объяс-

© В.Н. Сидорец, А.И. Бушма, А.М. Жерносеков, Е.Н. Верещаго, 2012

няется это большим количеством преимуществ по сравнению со сваркой на постоянном токе. Среди них: увеличение проплавления основного металла, увеличение скорости плавления электродной проволоки, качественное формирование сварного шва, возможность сварки в любых пространственных положениях, возможность осуществления различных типов переноса электродного металла. Подбор и оптимизация параметров сварочного процесса связанных с параметрами импульсов (амплитуде, частоте, скорости нарастания тока) дает дополнительные возможности управления сварочным процессом и получение качественных изделий.

Очень важным параметром процесса импульсно-дуговой сварки является скорость нарастания тока импульса. Именно при больших скоростях проявляются вышеуказанные преимущества. Однако опыт показывает, что при определенных скоростях наблюдается разрушение газовой защиты дугового разряда, что приводит к нестабильности сварочного процесса и появлению дефектов сварных швов.

Цель и задачи исследований. Настоящая работа посвящена исследованию стабильности газовой защиты импульсно-дугового разряда, т.к. от этой стабильности зависит стабильность технологического процесса в целом. В частности, такие исследования важны при разработке новых сварочных технологий, например, технологии импульсной лазерно-дуговой сварки, предложенной авторами [1].

Математическая модель динамики радиуса столба электрической дуги. Особенность обобщенной модели динамической дуги по сравнению с другими [2] является возможность выражения внутренней энергии столба дуги через ее электрические параметры.

А именно, из обобщенной математической модели динамической дуги [3] следует, что

$$Q = 2\theta \int_0^{i_0} U(i_\theta) di_\theta . \quad (1)$$

В обобщенной математической модели θ – постоянная времени дуги; i_0 – ток состояния дуги, определяемый как ток установившегося состояния на статической вольтамперной характеристике (ВAX) дуги, соответствующего данному динамическому состоянию, характеризующемуся током i [3].

Статическая ВAX дуги описывается зависимостью $U(i_0)$. В частном случае статической ВAX степенного вида

$$U(i_0) = U_0 \left(\frac{i_0}{I_0} \right)^n, \quad (2)$$

где I_0 и U_0 – ток и напряжение в фиксированной точке на ВАХ дуги; n – безразмерный показатель степени ($n = 0$ для ВАХ независимой от тока; $n = -1/3$ для свободно горящих дуг; $n = -1$ для дуг постоянной мощности), уравнение (1) приводится к следующему виду

$$Q = \frac{2}{1+n} U_0 I_0 \theta \left(\frac{i_0}{I_0} \right)^{1+n}. \quad (3)$$

С другой стороны, внутренняя энергия столба электрической дуги может быть выражена через термодинамические функции плазмы:

$$Q = l_A \int_0^{r_A} \left(\int_{T_0}^{T_A(r)} c_{pv}(T) dT \right) 2\pi r dr \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды; T_A – температура плазмы столба дуги, являющаяся функцией текущего радиуса r ; $c_{pv}(T)$ – удельная объемная теплоемкость; $c_{pv} = \rho_p \cdot c_p$; ρ_p – плотность плазмы столба дуги; c_p – удельная массовая теплоемкость плазмы.

Если воспользоваться теоремой о среднем, то уравнение (4) можно представить в виде

$$Q = \pi r_A^2 l_A \int_{T_0}^{T_{A,av}} c_{pv}(T) dT = \pi r_A^2 l_A q, \quad (5)$$

где $T_{A,av}$ – эквивалентное среднее значение температуры плазмы по поперечному сечению столба дуги; q – средняя удельная внутренняя энергия плазмы.

Приравнявая правые части выражений (5) и (3), находим

$$r_A = \sqrt{\frac{2E_0 I_0 \theta}{(1+n)\pi q}} \cdot \left(\frac{i_0}{I_0} \right)^{\frac{1+n}{2}}. \quad (6)$$

Здесь $E_0 = U_0/I_A$ – напряженность электрического поля в столбе дуги. Отметим, что значение $T_{A,av}$ слабо зависит от тока дуги и определяется в основном составом газа и электродов [4, 5, 6], поэтому подкоренное выражение в формуле (6) можно с достаточной для практики точностью считать не зависящим от i_0 .

При $i_0 = I_0$ значение $r_A = r_{A0}$, и из формулы (6) следует, что

$$r_A(t) = r_{A0} \left(\frac{i_\theta(t)}{I_0} \right)^{\frac{1+n}{2}}. \quad (7)$$

Выражение (7) задает закон изменения радиуса столба дуги r_A во времени и может рассматриваться как модель динамики радиуса столба дуги. С помощью этой модели можно ставить и решать задачи технологического содержания, где важным является изменение радиуса столба дуги во времени.

Ударные звуковые волны. Если в кривой тока имеются скачки (ступени), то при определенной их амплитуде скорость расширения канала дуги может превысить скорость звука, что порождает ударную волну. Этим обстоятельством можно объяснить тот экспериментальный факт, что при модулировании тока импульсами прямоугольной формы уровень интенсивности звука существенно возрастает [7].

Действительно, из уравнения (7) следует, что

$$\frac{dr_A}{dt} = \frac{1}{2} r_{A0} (1+n) I_0^{\frac{1+n}{2}} i_\theta^{\frac{1-n}{2}} \frac{di_\theta}{dt}. \quad (8)$$

Значение производной тока состояния по времени в уравнение (8) возьмем из дифференциального уравнения модели динамической дуги [8] и учтя, что в начальный момент скачка от тока I_0 до тока I_1 при $t = 0$ значения $i_\theta = I_0$, $i = I_1$

$$\left. \frac{dr_A}{dt} \right|_{t=0} = r_{A0} \frac{1+n}{4\theta} \left(\frac{I_1^2}{I_0^2} - 1 \right) \quad (9)$$

Ударная волна возникает в том случае, если

$$\left. \frac{dr_A}{dt} \right|_{t=0} \geq c \quad (10)$$

Отсюда следует, что условие возникновения ударной звуковой волны может быть записано в виде

$$\frac{I_1}{I_0} \geq \sqrt{\frac{4\theta c}{(1+n)r_{A0}}} + 1 \quad (11)$$

При значениях параметров дуги $\theta = 1 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $n = -1/3$, $r_{A0} = 2 \text{ мм}$ ударная волна возникает при $I_1 / I_0 > 3,31$.

Как известно, ударная волна разрушает газовую защиту, что приводит к проникновению атмосферного воздуха в сварочную зону и образованию различных дефектов.

В этом случае сварочный процесс сопровождается резкими хлопками большой интенсивности, которые хорошо слышны оператором-сварщиком.

Динамическое силовое воздействие лазерно-дугового разряда. Воспользуемся результатами работ [9], которые посвящены проблеме силового воздействия электрической дуги. Хотя в них довольно точно учтены все электромагнитные механизмы силового воздействия электрической дуги, анализ силового воздействия дан только в статике, а зависимость геометрических размеров электрической дуги, в частности радиуса ее столба, от величины тока во внимание не принималась. Постараемся расширить область применения имеющейся модели на случай лазерно-дугового разряда, при этом будем использовать те результаты работ [9], которые остаются правомерными и в случае изменяющегося радиуса разряда.

В первую очередь это касается такой важной характеристики силового воздействия, как давление на оси лазерно-дугового разряда. Поскольку лазерная составляющая является безтоковой, выражение для давления на оси лазерно-дугового разряда не отличается от выражения давления на оси дуги [9]

$$p_{\max} = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi^2 r_A^2}, \quad (12)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, i – ток дуги.

Формула (12) получена [9] для случая, когда радиус разряда величина постоянная ($r_A = \text{const}$), но она остается справедливой, когда радиус r_A является величиной изменяющейся.

Анализ динамического силового воздействия лазерно-дугового разряда. С учетом формулы (8) выражение для давления (12) по оси лазерно-дугового разряда $p_{\max}$ в динамике можно переписать в виде

$$p_{\max}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi^2} \cdot \frac{i^2(t)}{r_{A0}^2} \cdot \left(\frac{I_0}{i_0(t)} \right)^{1+n}. \quad (13)$$

Этим выражением (13) можно воспользоваться для анализа силовых характеристик автоколебательных режимов лазерно-дугового разряда, т.к. при исследовании электрических цепей с лазерно-дуговым разрядом [10] нами были получены временные зависимости, как тока разряда $i(t)$, так и его тока состояния $i_0(t)$.

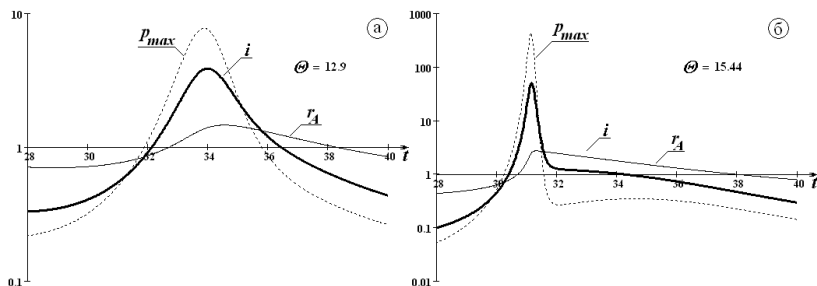


Рис. 1 – Временные зависимости тока лазерно-дугового разряда $i(t)$, его радиуса $r_A(t)$ и давления на оси разряда $p_{\max}(t)$: а – колебания, близкие к гармоническим; б – релаксационные колебания (ось ординат – логарифмическая).

Анализ кривых на рис. 1 показывает, что в случае как гармонических, так и релаксационных колебаний значение давления на оси разряда может превышать аналогичные значения давления при сварке на постоянном токе [1]. Этим объясняется увеличение глубины проплавления. Однако в случае релаксационных колебаний наблюдается бо́льшая скорость нарастания радиуса лазерно-дугового разряда.

Для исследования этого вопроса были построены временные зависимости радиуса лазерно-дугового разряда $r_A(t)$ и скорости его изменения (рис. 2). На этих же графиках был отложено значение уровня скорости звука (пунктирная линия), который в безразмерном виде представляется как

$$c_s = \frac{c\theta}{r_A}. \quad (14)$$

Как видно из рис. 2,а при колебаниях, близких к гармоническим, скорость изменения радиуса лазерно-дугового разряда гораздо меньше скорости звука. Очевидно, что в этом случае ничего не грозит газовой защите разряда.

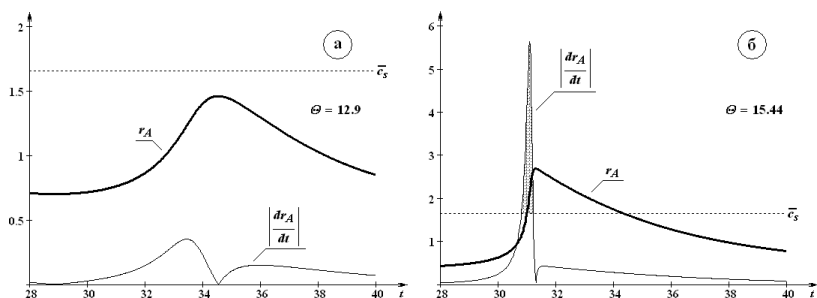


Рис. 2 – Временные зависимости радиуса лазерно-дугового разряда $r_A(t)$ и скорости его изменения: а – колебания, близкие к гармоническим; б – релаксационные колебания.

При релаксационных колебаниях скорость изменения радиуса лазерно-дугового разряда может превышать скорость звука (затемненный участок на рис. 2, б). Переход через звуковой барьер сопровождается возникновением ударной волны, которая приводит к разрушению газовой защиты.

Выводы.

1. При изменении тока импульсного дугового и лазерно-дугового разрядов могут возникать ударные звуковые волны, когда скорость изменения радиуса разряда превышает скорость звука.
2. Ударная звуковая волна может стать причиной разрушения газовой защиты, нестабильности сварочного процесса и возникновению дефектов сварных швов.
3. При создании новых импульсных лазерно-дуговых технологий и совершенствовании существующих импульсно-дуговых технологий необходимо учитывать, что скорость изменения тока должна лежать в определенном диапазоне, верхний предел которого соответствует разрушению газовой защиты разряда.

Поддержка научных исследований. Научные исследования, результаты которых изложены выше, проведены при финансовой поддержке "Государственного фонда фундаментальных исследований Украины" в рамках совместного украинско-российского проекта ДФФД-РФФИ-2011 (грант Ф40.7/047).

Список литературы: 1. А.И. Бушма, В.Н. Сидорец. Технологические характеристики колебательного лазерно-дугового разряда // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" – 2012. – №2(57). – С. 96-100. 2. Пентегов И.В. Сравнительный анализ математических моделей динамической сварочной дуги / И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец. // Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 33-36. 3. Пентегов И.В. Энергетичес-

кие параметры в математической модели динамической сварочной дуги / *И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец* // Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 36-40. 4. Отключение токов в сетях высокого напряжения / Под ред. К. Рагаллера. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 328 с. 5. *Поршнев П.И.* Энергобаланс положительного столба газового разряда атмосферного давления / *П.И. Поршнев.* // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 58, № 5. – С. 814-820. 6. *Лелевкин В.М.* Двухтемпературная модель столба сварочной дуги / *В.М. Лелевкин, В.С. Мечев, В.Ф. Семенов* // Автоматическая сварка. – 1990. – № 6. – С. 10-14. 7. *Futamata M.* Investigation on Welding Arc Sound (Rep.5). Effect of Welding Method and Welding Condition of Welding Sound (II) / *M. Futamata, T.Toh, K. Inoue*, et al // IW VIII-1344-86. – 7 p. 8. *Пентегов И.В.* Математическая модель столба динамической электрической дуги / *И.В.Пентегов* // Автоматическая сварка. – 1976. – № 6. – С. 8-12. 9. *Лебедев В.К.* Силовое воздействие сварочной дуги / *В.К. Лебедев, И.В. Пентегов* // Автоматическая сварка. – 1981. – № 1. – С. 7-15. 10. *Бушма А.И., Сидорец В.Н.* Амплитудно-частотные характеристики автоколебаний в цепи с лазерно-дуговым разрядом // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С.15-18.

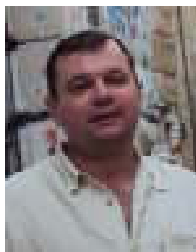
Поступила в редколлегию 26.11.2012



Сидорец Владимир Николаевич, доктор технических наук. Защитил диссертации кандидата и доктора технических наук в Институте электродинамики НАН Украины по специальности Теоретическая электротехника, соответственно в 1992 и 2009 гг. Ведущий научный сотрудник отдела "Физика газового разряда и техника плазмы" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины с 2009 г. Научные интересы связаны с проблемами моделирования нелинейных цепей с электрической дугой, взаимодействия лазерного излучения с металлами, детерминированного хаоса и странных аттракторов.

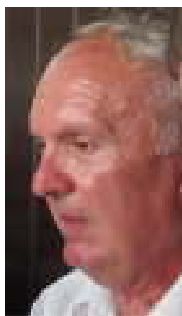


Бушма Александр Иванович, кандидат технических наук. Защитил диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете Украины "Киевский политехнический институт" по специальности Процессы физико-технической обработки в 2008 г. Научный сотрудник отдела "Физика газового разряда и техника плазмы" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины с 2006 г. Научные интересы связаны с проблемами лазерной обработки материалов, комбинированных лазерно-дуговых процессов.



Жерносеков Анатолий Максимович, кандидат технических наук. Защитил диссертацию кандидата технических наук в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины по специальности Автоматизация сварочных процессов в 2004 г. Старший научный сотрудник отдела источников питания Института электросварки им. Е.О. Патона с 2007 г.

Научные интересы связаны с исследованиями технологий, оборудования и автоматизации процессов электродуговой сварки, процессов импульсно-дуговой с варки плавящимся электродом в защитных газах.



Верещаго Евгений Николаевич, кандидат технических наук. Защитил диссертацию кандидата технических наук в Национальном университете кораблестроения им. адм. Макарова по специальности Сварка и родственные процессы в 2001 г. Доцент кафедры сварочного производства НУК с 2004 г.

Научные интересы связаны с исследованиями технологий и систем управления импульсными источниками питания для электротехнологических установок, исследованиями квазирезонансных импульсных преобразователей для плазменных технологий.

В.П. ШАПОРЕВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

В.В. СЕБКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НАНОХИМИИ ДЛЯ АНАЛИЗА И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрены основные принципы нанохимии и корреляция с нанотехнологией. Показаны применения этих принципов для создания новых материалов, анализа механизма и кинетики химико-технологических процессов.

Ключевые слова: нанохимия, корреляция, химико-технологические процессы.

Розглянуто основні принципи нанохімії і кореляція з нанотехнологією. Показано використання цих принципів задля створення нових матеріалів, аналізу механізму та кінетики хіміко-технологічних процесів.

Ключові слова: нанохімія, кореляція, хіміко-технологічні процеси.

The basic principles of the nanochemistry and the correlation with nanotechnology are considered. Employments of these principles for the creation of new materials, analysis of mechanism and kinetics of chemical and technological processes are shown.

Keywords: nanochemistry, correlation, chemical and technological processes.

Введение. Разработка и синтез наноструктурных материалов становится сегодня все более важной составляющей научно-технического прогресса, внедряющейся во многие промышленные технологии. В основе разработки и синтеза таких материалов по определению G. Ozin [1] лежит нанохимия. Очевидно, что термин нанохимия состоит из двух слов "нано" и химия. "Нано" является описанием соответствующих размеров в этой области, а именно нанометровых размеров. В настоящее время это определение уже не является абсолютно правильным, потому что "нано" может означать всё, что превышает молекулярные размеры (длина более 1 нм) и меньше макроскопических размеров (менее 1 мкм). Это позволяет говорить о "мезохимии". В этом аспекте химия (второй компонент нанохимии) может означать два вида событий: строительство крупных единиц из более мелких (синтетическая точка зрения), что описывается известным выражением "снизу-вверх", или простые реакции между молекулами без образования прочных химических связей (физико-химическая точка зрения).

Подход "снизу-вверх" противостоит подходу "сверху-вниз" принятому в нанофизике [2] и наноинженерии, в основе которого лежит принцип уменьшения размера частиц с увеличением их удельной поверхности, при этом нарушается инвариантность физических и физико-химических характеристик системы относительно количества и геометрических размеров первичных элементов структуры конденсированной фазы. Указанные изменения приводят к изменению химической активности, магнитных, оптических, электрических, сверхпроводящих, механических, каталитических и других свойств.

Иными словами, нанохимия и нанофизика описывают, как этот особый вид материи может быть создан и организован путем разработки новых экспериментов с применением известных химических и физических методов.

Большой частью исследований в нанохимии и нанофизике было и остаётся разработка методов производства наночастиц различного состава, избирательных размеров и форм. В основном можно выделить следующие стратегии для синтеза наночастиц [1, 2]:

- формирование ультрадисперсных частиц кристаллических материалов различными физическими и химическими методами, которые при одновременном получении частиц с размером менее 100 нм обеспечивают увеличение свободной энергии системы при постоянной температуре, давлении и объеме. При расчете величины свободной энергии в стандартное уравнение вводится слагаемое, являющееся произведением коэффициента поверхностной энергии на величину прироста площади поверхности.

К этому же направлению относится направление по созданию "мезопористых" материалов с размером пор от 2 до 50 нм, которые имеют развитую внутреннюю активную поверхность, сильные электрические поля в каналах, которые сводятся к кулоновским эффектам. Все это позволяет такие материалы приравнять к наноматериалам нового поколения.

Следует отметить, что по классификации [2, 3] вышеотмеченное позволяет синтезировать наноматериалы первого рода (или консервативные системы), в которых ближний порядок и симметрия укладки атомов не отличается от строения массивного материала. По-видимому, к консервативным системам следует отнести "самоорганизующийся синтез", когда малые единицы удерживаются слабыми межмолекулярными силами (Ван-дер-Ваальса, электростатическими) в организованные структуры. Примером могут служить: молекулярные кристаллы, жидкие кристаллы, мицеллы, эмульсии, фазо-разделенные полимеры, пленки

Лентмюра-Блоджет и самоорганизующиеся монослои. Эти все структуры находятся в термодинамическом равновесии и их синтез подчиняется классическим законом равновесной химии [4].

Следует отметить, что само явление самоорганизации вещества в указанных условиях, а также в открытых диссипативных системах остается малоизученным эффектом.

- Последовательное формирование ковалентных связей. Этот метод позволяет генерировать ультрадисперсные структуры ограниченного размера, но вдали от термодинамического равновесия. При направленных фазовых переходах, которые описываются физикой открытых систем, выполняются следующие условия:

1. Система термодинамически открыта, т.е. обменивается энергией и веществом с внешней средой;
2. Система описывается нелинейными уравнениями;
3. Отклонения от равновесия превышает критические значения (близко к теории катастроф);
4. Макроскопические процессы проходят согласовано.

В результате получается так называемые диссипативные структуры или синергетические наноматериалы с особенностью строения, которое не подчиняются законам классической кристаллографии. Примерами таких материалов являются: "графен"; нанотрубки; углеродные, бор-нитридные, бор-карбидные, пентаоксида ванадные, диоксида титана, халькогенидные (WS_2); фуллерены и другое.

- Ковалентная полимеризация, условия аналогичные предыдущему пункту. Производятся макромолекулы (макрочастицы) с высокой молекулярной массой, например, полиоксометаллаты. Эти молекулы обладают четко определенными внутренними полостями и имеют очень большую площадь поверхности. Однако отмечается большая трудность контролировать необходимый состав и управлять процессом. Итак, указанные стратегические направления создают концепцию нанотехнологии, которая определяется как инженерная дисциплина и в которой рассматривается важная задача, заключающаяся в подготовке функциональных устройств и структур, которые имеют все субъединицы (молекулы или атомы) нанометрового размера в соответствующем месте. В этом случае все субъединицы с известными свойствами действуют вместе и создают новые функции, а иногда неожиданные свойства. Примером могут служить так называемые "смарт-материалы". Это материалы, которые в состоянии динамически реагировать на раздражители извне (химические или физические). Все это свидетельствует о том, что получаемые тем или иным способом наноматериалы могут обладать многоу-

ровневой иерархической структурой, в которой каждый уровень выполняет свою функцию. Концепция развития этого направления и создания таких материалов сформулирована в работах В.А. Легасова, Ю.Д. Третьякова и Н.Н. Олейникова [5, 6].

Вышеприведенный краткий обзор дает общие представления о природе неорганических наноматериалов, информация о наноматериалах распылена в десятках тысяч публикаций, в периодических изданиях, в Интернете и при этом практически не обобщена. С нашей точки зрения, большим недостатком является то, что в периодической литературе отсутствует анализ механизмов и кинетики многих химико-технологических процессов, в которых первичные акты взаимодействия протекают на уровне наносистем.

Цель работы. В этой статье на основе результатов собственных исследований сделана попытка обратить внимание на эту сторону вопроса. К таким процессам, в полной мере, относятся многие процессы термического разложения, пиролиза, кристаллизации, роста кристаллов, самосборка кристаллов и другие [7].

Основная часть. Практически во всех вышеперечисленных процессах первичные акты связаны с подготовкой и образованием наноразмерных объектов (например, зародыш новой фазы). При образовании этих объектов реализуется в основном два подхода: самоорганизация процессов и концепция нанореактора, что соответствует подходу "снизу-вверх" [17].

Общей идеей всех известных самоорганизующихся первичных структур является то, что они делят макроскопические объёмы на малые компартменты, всего лишь несколько нанометров. Например, под влиянием термодинамических параметров системы (P , T) в "слабых" местах твёрдого тела (дефектах) создаются новообразования нанометрового размера-зародыша новой фазы; в других системах мицеллы создают сферические компартменты (мицельные ядра) величиной несколько нанометров; в пересыщенных растворах образование первичных ядер кристаллизации; образование мезопористых структур в твердом теле и другое.

Самоорганизующиеся структуры в результате протекания первичных актов представляют собой пространственные структуры и, следовательно, являются прототипом нанореактора [8]. Требования, которые могут быть предъявлены для хорошего нанореактора очень похожи на существующие для макроскопических реакторов, используемых в лабораторных и промышленных условиях, а именно: объём реактора должен быть доступным и материал стенок должен быть в состоянии

проявлять переменные свойства, независимо от других параметров. Реакторы должны быть управляемы в размерах, что позволяет контролировать количество вещества (стехиометрию) и энергии приходящейся на реактор.

В итоге можно утверждать, что может образоваться прототип жесткого нанореактора – зародыш новой фазы при топохимических превращениях твердых тел и (или) пористые материалы, а также прототип мягкого реактора – новообразования в пересыщенных растворах или раствор – расплавах, или эмульсиях. Соотношение характеристик процессов на уровне самоорганизации (молекулярный уровень) и воздействие на процессы более высокого масштаба, которые в основном описывают формирование специфических наночастиц соотносятся к размерам самого нанореактора. Наши исследования, известные из литературы, в области кристаллизации твердой фазы из пересыщенных растворов и раствор-расплавов подтверждают вышеизложенные положения [9-16, 18-21] о концепции нанореактора.

В вышеотмеченных работах исследовались системы раствор – расплав $K_2CO_3 - TiO_2 - KCl - hKF$; $K_2Ti_6O_{13} - KCl - hKF$; $K_2Ti_6O_{13} - K_2SO_4 - hKF$; $K_2Ti_6O_{13} - K_2MO_4 - hKF$; $YBa_2Cu_3O_x - KCl$; $KCl - NaCl - MgCl_2nH_2O$; $KCl - NaCl - \Sigma TiCl_2, TiCl_3$; а также системы: раствор $NaCl - NH_3 - CO_2$; $Na_2CO_3 - CO_2$. В системах раствор – расплава [9-16] концентрация кристаллизующего вещества $K_2Ti_6O_{13}$, $YBa_2Cu_3O_x$, MgO , TiO_2 составляла 0,5-6 %, снятие пересыщения по кристаллизующему веществу осуществлялось охлаждением от температуры 1250 К со скоростью 0,066-0,15 о/мин, целью процесса являлось получение нитевидных кристаллов (вискеров) с поперечным размером 0,5-1 мкм.

При исследовании систем, состоящих из растворов [18-21], которые широко используются в производстве кальцинированной соды, целью процесса было получение пересыщенных растворов по $NaHCO_3$ и кристаллизация этого соединения в виде ассиметричных бочкообразных кристаллов. Анализ транспортных процессов в исследуемых системах [9-16, 18-21] при достижении пересыщения показал, что структура системы зависит от возможности протекания процессов универсальной или специфической сольватации. При этом в результате протекания специфической сольватации раствор с веществом, которое растворено и будет кристаллизоваться, образует, как правило, устойчивые комплексы, в которых до определенных условий сохраняются структура и свойства начальных молекул. При протекании универсальной сольватации системы, как правило, находятся в предкристаллизационном состоянии. В таких условиях структура раствора очень хорошо повторяет структуру кристалла растворителя, система подобная

коллоидному раствору, который состоит из квазикристаллических образований размером 1-100 нм (0,001-0,1 мкм), погруженных в "истинную" жидкую фазу.

Было установлено [9-16], что в обоих случаях при заданной мере пересыщения перед началом кристаллизации растворенного вещества системы состоят из растворителя и квазикристаллических образований. Термодинамическая оценка при фиксированной температуре показала, что при выполнении условия $\Delta G \approx \Delta G_{\text{зар.}} \approx \Delta G_{\text{кв.}}$ квазикристаллические образования служат зародышем для образования и роста кристаллов, соответственно, при этом возникает межфазная поверхность кристалл – раствор. Условлено, что под влиянием движущих сил, которые приложены к образованию (разности температур, концентраций, давлений) образование может двигаться как единое целое. Такое движение есть следствием направленного потока вещества в объеме и осаждения на тыльной стороне образования. Таким образом, как установлено [9-16], квазикристаллические образования при определенных условиях играют роль микроскопической емкости кристаллизатора (микро, или мезо, или нанореактора). Вышеуказанные условия и соответственно размеры и форма образований регулируются и управляются, как показано в [9-16], составом растворов, величиной движущей силы и величиной коэффициента граничной кинетики.

Для иллюстрации того, что механизм кристаллизации вещества происходит через вышеописанные стадии и, в соответствии с вышеизложенными явлениями, приводим на рис. 1-3 начальные стадии роста кристаллов из квазикристаллических образований.



Рис. 1 – Ступень роста НК в системах $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13} - \text{KCl} - \text{hKF}$; $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{hKF}$ – экспоз. 1, А – квазикристаллическое образование; 2 – рост НК в системе $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13} - \text{KCl} - \text{hKF}$; 3, 4 – роста НК в системе $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{hKF}$ (микроскоп JSM-2 Японии).

Приведенные на рис. 1 экспозиции свидетельствуют о том, что ступеньки роста нитевидных кристаллов (1) формируются из квазикристаллических образований (А) в раствор – расплаве, которые оцениваются величиной 0,1-0,5 мкм, а затем в зависимости от состава расплава при прочих равных условиях наблюдается рост НК и формирование кристалла. Очевидно, что в данном случае достигается самый высокий уровень нанохимического инструмента, когда сочетается форма и размер квазикристаллического образования с 3-мерным распределением, что дает в результате нанохимический инструмент, позволяющий получить расположение наночастиц в определенном структурном порядке и получить новый материал – НК (вискеры). На рис. 2 приведена аналогичная экспозиция для системы $KCl - NaCl - MgCl_2 \cdot nH_2O$.



Рис. 2 – Рост НК MgO в системе $KCl - NaCl - MgCl_2 \cdot nH_2O$;

А – квазикристаллическое образование.

Следует отметить, что в одной из последних публикаций Ю.Д. Третьякова и Е.А. Гудилина (МГУ) [17] описывается синтез минеральных волокон $Ba_6Mi_{24}O_{48}$, базируясь на аналогичных технологических приемах, что освещены в работах [9-16]. Толщина полученных вискеров ~ 1 мкм. В работе [17], используя те же технологические приёмы, синтезированы псевдомонокристаллические вискеры одномерных суперионных проводников с композитной туннельной структурой $Ba_6Mi_{24}O_{48}$. Это свидетельствует о том, что приведенные нами примеры и применения нанохимических подходов к исследованию механизмов и анализу химико-технологических процессов могут играть определенную роль. Последнее, как уже отмечалось в тексте, присуще и для гетерогенных систем газ – жидкость, газ – жидкость – твёрдое, которые исследованы нами в работах [18-21]. На экспозиции 3 для системы раствор $Na_2CO_3 - CO_2$ приведено изображение межфазной поверхности по длине реактора.



Рис. 3 – Изображение межфазной поверхности по длине канала:
а – участок I – II, б – участок II, г – участок II – III.

Наблюдаемая картина на кадрах снята в момент достижения необходимого пересыщения в системе по NaHCO_3 и позволяет предположить существование вблизи межфазной поверхности в жидкой фазе неоднородностей размером до 1 мкм (рис. 3). В этой связи можно допустить, что при хемосорбции газа (CO_2) жидкостью, первоначально происходит образование новой квазифазы (продукты реакции с диоксидом углерода). Эта квазифаза характеризуется большей плотностью по сравнению с начальным раствором и некоторым поверхностным натяжением на границе "квазифаза – раствор", которое и удерживает её вблизи межфазной границы. Дальнейшее развитие процесса хемосорбции связано, по-видимому, с ассоциацией квазифазы и образованием зародышей новой фазы. На рис. 4, приведены экспозиции кристаллов NaHCO_3 , отобранных по высоте колонны в разных сечениях.

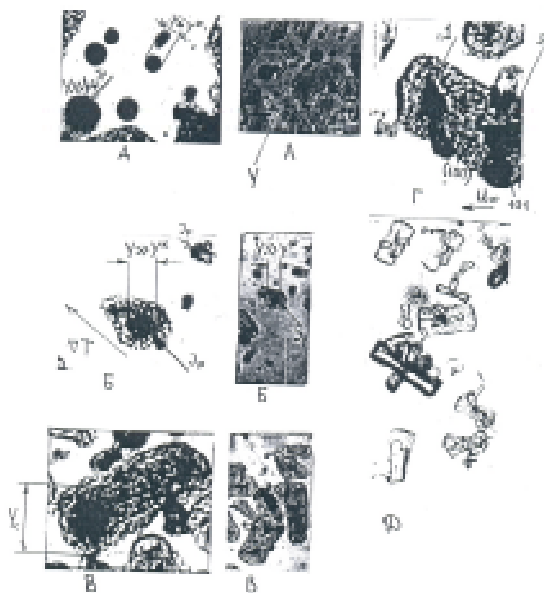


Рис. 4 – Экспозиция кристаллов NaHCO_3 , отобранных по высоте КЛ в различных сечениях (объяснение по тексту): а – "включения" и момент, когда начинается их движение; б – моменты движения включения; в – завершение роста кристаллов в диффузионном режиме; г, д – экспозиции, фиксирующие явление вицинальной секториальности.

На экспозиции А зафиксированы "включения" и момент, когда начинается их движение, то есть момент начала роста кристалла. На

экспозиции *Б* (рис. 4) зафиксированы моменты движения включения, то есть момент роста кристалла. На экспозиции *В* показано завершение роста кристаллов в диффузионном режиме и размер Y_c , характеризующий переход к кинетическому режиму. Одним из факторов, который свидетельствует о кинетическом росте, является вицинальная секториальность. На рис. 4, *з, д* показаны экспозиции, фиксирующие это явление. Вицинальная секториальность, ухудшает качество кристаллов, приводит к значительным отклонениям от равновесной формы, повышает пористость и вероятность захвата примесей. Основной причиной этого явления есть смена центров роста кристаллов. На рис. 4, *з* показано, что ведущий центр роста – "включения" заменяется на два новых центра 1, 2, которые заем приводят к вискеризации рис. 4, *д*.

В работах [18-21] было установлено, что определяющую роль в рассматриваемых явлениях (смена центра роста, вискеризация) играют величины скорости потоков фаз U_x и dT/dH , где H – рабочая высота колонны. Поскольку снижение или увеличение U_x в КЛ ограничено гидродинамическими принципами, то определяющую роль будет

играть $\frac{d\Delta\Pi}{d\tau} \approx \frac{d\Delta\Pi}{dH}$, где $\Delta\Pi$ – величина пересыщения по кристаллизующему веществу.

Вышеизложенные примеры можно отнести к концепции "мягкого нанореактора", которая применена для анализа механизмов исследуемых процессов. Применение концепции "жесткого нанореактора" для анализа топомимических процессов и создания композитных структур катализаторов приведено ниже.

Для этого случая можно выбрать и привести десятки примеров, которые предусматривают различные методы увеличения в твёрдом материале потенциальных мест зародышей развития вплоть до равномерного распределения этих мест по объёму, а также обеспечение создания определенной формы зародыша [22-24], что позволяет управлять не только кинематикой процесса, но геометрической формой частиц продукта реакции. Однако с нашей точки зрения в качестве эффективных жёстких нанореакторов являются пористые материалы. Пористые материалы характеризуются наличием твёрдой сети имеющейся пустоты по всему материалу. По IUPAC, пористые материалы характеризуются размером пор с разбивкой на категории согласно сорбционного поведения. Есть микропористые твёрдые тела с размером пор от 2 нм до 50 нм, и макропористые с порами более 50 нм. Здесь мы рассмотрим мезопористый кремневый материал. Кремнезём SiO_2 получается в процессе перехода золь-гель [1, 25-27]. В зависимости от старения и последующей обрабо-

тки функциональность поверхности конечного материала может варьироваться от сильно полярных протонных Si-OH групп до относительно неполяризованных и неактивных Si-O-Si групп.

Был подготовлен мезопористый кремний, отличающийся лишь свойствами поверхности пор путём жидкостной экстракции и последующей сверхкритичностью сушки (силано-богатый материал), а также высокотемпературным обжигом при 1200° С (силано-бедный материал) на этих материалах исследовали восстановление $[\text{PdCl}_4]^{2-}$. Конкретное взаимодействие между раствором $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ и поверхностью пор обнаружено было уже при пропитке силано-богатого материала раствором – изменялась окраска. Взаимодействие плоско-квадратного Pd – комплекса и Si-OH группы, как правило, не встречается, так как Si-OH – это слабый лиганд. Однако, по-видимому, в нанопорах это возможно. Кривизна мезопор предположительно ведёт к высвобождению воды с поверхности пор, когда происходит связывание. Это выделение воды поставяет энтропийную движущую силу для формирования необычного поверхностного комплекса. Когда $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ восстановлен, это взаимодействие предотвращает Оствальдовское созревание после окончания процесса нуклеации Pd° до более крупных кристаллов. Таким образом, результат эффективного нанохимического инструмента приводит к тому, что Pd-частицы не видны в трансмиссионном электронном микроскопе. Полученный мезопористый материал на основе кремнезёма содержит наночастицы Pd, которые, несомненно, будут более активными в различных процессах гетерогенного катализа.

Когда, с другой стороны, силано-бедный материал используется, это взаимодействие не присутствует, что можно увидеть по "нормальной окраске" инфильтрованного материала. $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ частицы, которые находятся в объеме пор могут свободно передвигаться и, следовательно, согласно Оствальдовскому созреванию образуют более крупные частицы. Тем не менее, поры ограничивают рост наночастиц до полного соответствия с размером и формой пор нанореактора. Очевидно, что и в этом случае нанохимический инструмент является эффективным. Если, наконец, увеличить нагрузку этого материала большим количеством Pd, так что каждая пора будет заполнена металлом, можно получить взаимное самоупорядочение наночастиц и новый гибридный материал.

Выводы. Мы видим, что в различных химико-технологических процессах первичные акты, приводящие к развитию процессов и получения продуктов, в полной мере можно отнести к нанохимическим инструментам. Результаты первичных актов представляют собой единичные наноструктуры, для получения функциональной системы еди-

ничные структуры должны быть объединены в сложную систему, что в результате приводит к желаемому результату процесса. На этот результат влияют нелинейность взаимодействия между наноструктурами и пространственные ограничения на молекулярные химические процессы. Указанное гораздо в меньшей степени исследовано в химической технологии и возможно исследования в этом направлении с использованием нанохимических инструментов приведут к более углубленному пониманию механизма процессов и совершенно новым технологическим приёмам.

Список литературы: 1. Mühlenweg Heike, Gutsch Andreas Nanoproszesstechnik // Ghem – Ing – Techn. – 2000. – 72. № 9. – P. 1022. 2. Fernandez – Bertrau Jose F. Mechanochemistry: An overview. Pap. 3rd International Congress of the Cuban Chemical Society, Havana, 1-4 Dec. 1988 // Pure and Appl. Chem, 1999. 71. № 4. – P. 581-586. 3. В.М. Шулаев О природе неорганических наноматериалов // Металлообработка. Международный информац. – технический журнал. 2007, №6 (95). – С. 96-99. 4. This issue of Transactions Part A contains a Special Section on particle technology // Chem. Eng. Res and Des. A. 2001. 79 №3. – P. 221-346. 5. Ю.Д. Третьяков, М.Г.Слинько, И.В. Мелихов Материалы семинара по проблеме "нелинейная динамика химических реакций, процессов и реакторов" // Теоретические основы химической технологии, 2007. – Т. 41. – №2. – С. 237-238. 6. Е.А. Домератсева, Д.М. Итис, Е.А. Goodilin, J.G. Nondem, M.V. Lobanov, M. Greenblant, Y.D. Tretyakov Homogeneity field and magneto resistance of the $\text{Ca}(\text{Mn}, \text{Cu})_7\text{O}_{12}$ solid solution prepared in oxygen // J. Mater. Chem. 2004, v. 14. – Pp. 1150-1156. 7. Б. Дельмон. Кинетика гетерогенных реакций. М.: Изд. Мир. – 1972. – 554 с. 8. A.S. Sinitskie, S.O. Klimonsky, A.V. Garshev, A.E. Primenko, Yu.D. Tretyakov Synthesis and microstructure of silica photonic crystals // Mendeleev Communications, vol. 14. – 2004. – Pp. 165-167. 9. Шанопев В.П. Технологія неорганічних армуючих наповнювачів / Дисерт. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук за спец. 051701 – технологія неорганічних речовин. Харків, ХДПУ. – 1995, 380с. 10. Шанопев. В.П. Синтез нитевидных кристаллов гексатитаната калия при взаимодействии карбоната калия и оксида титана в твёрдой фазе // Журн. приклад. химия. – 1991. – №2. – С. 294-302. 11. Шанопев. В.П. Физико-химические свойства нитевидных кристаллов $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ синтезированных различными методами // Неорганические материалы. – 1992. – Т. 28. – № 5. – С. 1045-1052. 12. А.С. СССР №1101412. Способ получения волокнистого титанита калия 07.07.84. Публ. запрещена, Б.25. 13. А.С. СССР №1215354. Способ получения волокнистого материала 01.10.85. Публ. запрещена. 14. А.С. СССР №1274236 Способ получения волокнистого титанита бария 01.08.86. Публ. запрещена. 15. А.С. СССР Способ выращивания нитевидных кристаллов титанатов щелочных металлов и тугоплавких оксидов. 15.01.91. Публ. запрещена. 16. А.С. СССР 1019756. Устройство для выращивания нитевидных кристаллов. 08.09.90. Публ. запрещена. 17. Микро- и Наномир современных материалов / Хим. фак. МГУ, каф. неорг. химии, лаборат. неорг. материаловед. интернет. goodilin@inorg.chem.msu.ru.

fmg.inorg.chem.msu.ru – 2006, 69 с. **18.** Шапоров В.П., Лопухина О.А., Иванов Ю.А. Моделирование процесса кристаллов из раствора кристаллизанта, образующих взаимодействий солевых растворов с газообразным CO_2 // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1998. – №25. – С. 97-103. **19.** Шапоров В.П., Титов В.М., Иванов Ю.А. Влияние начального пересыщения на интегральные характеристики дисперсной фазы, осаждающейся в карбонизационной колонне содового производства // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1999. – № 28. – С. 49-96. **20.** Иванов Ю.А., Шапоров В.П., Титов В.М., Долгарт А.Ф. Исследование кинетики кристаллизации твёрдой фазы из пересыщенного раствора // Научн. труды НИОХИМ: Химия и технология производства основной химической промышленности. 1998. – Т. 61. – С. 82-84. **21.** Пат. № 65361, Украина, МПК (2011.01) B.0178/00 карбонизация колона для здійснення складно-реакційного гетерогенного процесу / Васильев М.І, Пітак І.В., Моїсєєв В.Ф., Цейтлін М.А., Шапоров П.П, Алаа Файяд Макки – № u201102687. Заявлено 09.03.2011. Опубл. 12.12.2011. Бюл. 23. **22.** В.В. Болдырев Регулирование химических реакций в твёрдой фазе // Изв. Сибирск. отделения Акад. Наук СССР (серия химическая). – 1977. – № 7. – вып. 3. – С. 48-60. **23.** Шапоров В.П., Булат А.Е. Активация окиси магния методом циклического изменения температуры // Неорганические материалы. – 1980. – Т. 18. – № 8. – С. 1430-1434. **24.** Шапоров В.П., Булат А.Е. О влиянии добавок на термическую стойкость гидратированных карбонатов магния // Журнал прикл. химия. – 1981. – Т. 54. – № 2. – С. 228-234. **25.** Васильев М.И., Шапоров В.П. Исследование структуры многофазного закрученного потока в криволинейном канале и математическая модель газожидкостного реактора (карбонизация раствора силиката натрия) // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2009. – № 37. – С. 3-12. **26.** Стрелко В.В. Сорбенти нового покоління для високих технологій, екології та медицини / доповідь на засід. Наукової сесії відділення хімії НАН України. – Харків: НТУ "ХПИ", 19-20 травня 2011. **27.** Е.И. Далматская Кинетика и статика карбонизации растворов силиката натрия // Тр. НИОХИМ. Работы по технологии производства наполнителей и адсорбентов минерального происхождения. – Госхииздат. – 1963. – Т. XV. – С. 83-92.

Поступила в редколлегию 05.07.2012

Э.В. САВИЧ, пенсионер, до 1994 г. зав. отделом ЦЭБОТнефтегаз, Харьков

АТМОСФЕРА ЗЕМЛІ

Положительно заряженный ионный слой Земли электризует через влияние отрицательными индуцированными зарядами поверхность Земли, способствующими появлению напряженности магнитного поля N' ее поверхности, которое во взаимодействии с магнитным полем Космоса N'' обеспечивают возникновение атмосферного электричества и, на основе магнитного взаимодействия, подвешивание вывеси атмосферы равновесие земной многотонной паровой облачности.

Ключевые слова: ионный слой, магнитное поле, атмосферное электричество.

Позитивно заряджений іонний шар Землі електризує через вплив негативними індукованими зарядами поверхню Землі, сприяючими появі напруженості магнітного поля N' її поверхні, яке у взаємодії з магнітним полем Космосу N'' забезпечують виникнення атмосферної електрики і, на основі магнітної взаємодії, підвищення вивіси атмосфери рівноваги земної багатотонної парової хмарності.

Ключові слова: іонний шар, магнітне поле, атмосферний електрику.

A positively charged ion layer of the Earth excites through the influence by induced negative charges the Earth surface, contributing to the emergence of the magnetic field N' of its surface, which in interaction with the magnetic field of the Cosmos N'' provides the appearance of atmospheric electricity and, on the basis of the magnetic interaction, suspended height balance of the Earth atmosphere of the multi-ton steam clouds.

Key words: ion layer, magnetic field strength, atmospheric electricity.

Введение. За прошедшие 100 лет приоритеты физики Земли значительно изменились, но, несмотря на многочисленные попытки решения проблемы глобального конденсатора атмосферы Земли, каким же должен быть источник атмосферного электричества, ответ до настоящего времени так и не получен? И потому нельзя рассматривать атмосферное электричество в отрыве от энергетического взаимодействия Мирового пространства и планеты Земля.

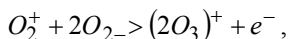
Именно в совокупном действии электромагнитных полей Земли и космоса заключается сущность природы атмосферного электричества, а не в надуманной локально обособленной от действия Космоса, защищенной системы заряда и разряда глобального конденсатора, где

в атмосфере, вместо электронов, вверх вниз перемещаются, какие-то различные по весу ионы, как это утверждают многие ученые.

Цель работы: дать атмосферному электричеству определение в соответствии с классической физикой, которая гласит: Если под действием тех или иных причин заставить свободные электроны смещаться в одном направлении, то такое упорядоченное движение свободных электронов будет представлять собой электрический ток [1].

Природа атмосферного электричества. "Поскольку атмосфера обладает конечной электропроводностью, создаваемое в ней (поляризованными облаками и их электрическими "изображениями") электромагнитное поле вызывает электрические токи, замыкающиеся через Землю. Непосредственно над поверхностью Земли эти токи имеют вертикальное направление: над безоблачными участками атмосферы – космоса вниз, а под облаками – вверх (точнее от земли к нижней кромке облаков и выше)" [2], что является действием напряженности магнитного поля Земли, имеющего направление действия напряженности по отношению к облаку полем S' и поляризованного облака с напряженности поля N . Взаимодействие магнитных полей между космосом и Землей заключается в том, что Земля в целом по отношению к магнитной напряженности космоса с полем N'' имеет направление силовых линий магнитной напряженности поля S' . Так как Земля, имея постоянное магнитное поле S' ядра, вращается в магнитном космическом поле N'' со скоростью вращения один оборот за 24 часа, то в плазме магмы Земли, перпендикулярно оси вращения Земли индуктируются ЭДС, вызывающие в магме электрические токи, в результате которых Земля обретает еще одно свое переменное осевое магнитное поле $N-S$, силовые линии которого распределяются поверху объема Земли и атмосферы, образуют совместно с поляризованным облаком с полем напряженности $N-S$ электрический ток от Земли к облаку и выше к космическому полю N'' .

На рис. схематично отображен физический процесс атмосферного электричества, где космические лучи магнитного поля N'' , проникая в верхние слои атмосферы Земли, создают определенные условия, при которых происходит электронно-возбуждающее действие молекул атомарного кислорода, приводящее его к химически активной реакции ионизации кислорода:



образуя из атомов кислорода положительно поляризованные ионы озона и электрон.

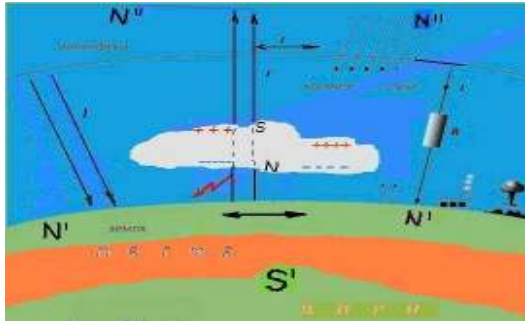


Рис. – Схематическое отображение физического процесса атмосферного электричества.

Таким образом, вокруг атмосферы Земли формируется ионосфера Земли, насыщенная положительно заряженным ионным озоновым слоем, который плотно окружает атмосферу Земли и защищает ее поверхность и все живое на Земле от пагубных действий радиационного космического излучения. Расположение ионосферы в верхних слоях атмосферы обусловлено действием гравитационных сил притяжения молекул озона вниз к Земле и также компенсационным притяжением вверх, положительно заряженного ионного слоя, космическим полем N'' . Положительно заряженная ионосфера, под влиянием напряженности своего электростатического поля положительного заряда, создает условие влияния электростатической индукции [3], т.е. условие появления из свободных электронов на поверхности Земли, индуцированные отрицательные заряды, из которых, в свою очередь, образуется на поверхности Земли магнитное поле N' . Под воздействием магнитного поля N' , в результате химически активной реакции образования озона, высвободившиеся под действием космических лучей из электронно-возбужденных молекул кислорода, электроны устремляются к поверхности Земли и заряжают ее. Этим демонстрируется, так называемый, процесс атмосферного электричества "хорошей погоды". В другой момент времени, образовавшаяся паровая облачность перекрывает, экранирует действие влияния напряженности электростатического положительно заряженного поля ионосферы и, затененная облаком, поверхность земли уже не индуцируется отрицательными зарядами, и, наоборот, под воздействием магнитного поля N поляризованного облака, с затененной облаком поверхности Земли вверх начинает течь электрический ток, компенсирующий электрический ток, атмосферного электричества "хорошей погоды", текущего сверху вниз. Так как поляризованное паровое облако является токопро-

водящим, то электрический ток, пронизывая паровое облако и не задерживаясь в облаке, течет дальше вверх в зону ионосферы, где, также, не задерживаясь, и уже под действием космического поля N'' , с некоторым незначительным преобразованием ионосферы, уходит ввысь космического пространства.

Суть предлагаемой идеи атмосферного электричества состоит в том, что грозы и разряды молний не оказывают заметного влияния на атмосферное электричество и не являются основным его источником. Согласно модели, образование электрических токов происходит за счет ионизации верхних слоев атмосферы космическими лучами, а электрический ток атмосферного электричества "хорошей погоды" и электрический ток от земли вверх компенсируют друг друга. Заметим, что электропроводимость воздуха обуславливается, в основном, ионизирующим действием лучей космической энергии, постоянно проникающей из мирового пространства в верхние слои атмосферы Земли.

Атмосферный магнетизм земли. Что же касается перемещения вверх поляризованного облака, удельный вес которого значительно превышает удельный вес воздуха, то в начальном моменте, когда паровое облако, еще, не будучи намагниченным, оно поднимается вверх под действием выталкивающих сил атмосферного давления и центробежных сил вращения Земли, преодолевающих гравитационные силы, силы тяжести пара. При намагничивании паровое облако, когда его частицы, будучи поляризованы, выстраиваются в цепочные соединения, при котором каждая частица пара положительно заряженной частью диполями молекул присоединяется к отрицательно заряженной части и уже соединенные частицы пара облака, имея постоянное магнитное поле $N-S$, но в целом оно будет иметь заряд равный нулю. При этом облако поддерживается на плаву и не только атмосферным давлением, но на облако снизу действуют еще и отталкивающие магнитные силы взаимодействия поля N' Земли и силы собственного магнитного поля $N-S$ облака, которое сверху еще и притягивается магнитной напряженностью космического поля N'' . Таким образом, тяжелое многотонное паровое облако, преодолевая гравитационные силы, приподымается над Землей. Именно действия магнитных полей Космоса, Земли и облака способны объяснить, почему водяное паровое облако, которое значительно тяжелее воздуха и верхняя его часть облака, находясь при температуре от 0°C до -43°C и будучи уже в состоянии ледяных частиц, достигает высот выше 18 км. При этом, начиная с -4°C , т.е. с момента уменьшения плотности льда, в кристаллических решетках ледяных частиц облака снижаются межмолекулярные силы

водородных связей, и при температуре -43°C снижение действия сил водородных связей достигает максимума, что приводит к перестройке ледяных частиц и их максимуму намагничиванию, однако при этом состояние намагниченности частиц неустойчивое. Следует отметить, что неустойчивая частичная поляризация на основе гетерополярных связей посредством дипольных соединений, находящихся на концах кристаллических решеток ледяных частиц, которые, имея на окончаниях ледяных частиц положительные и отрицательные потенциалы, соединяются в последовательно-параллельные образования (как соединяются гальванические элементы в батарее). Кристаллы с положительным потенциалом в верхней части присоединяются к отрицательному потенциалу нижней частицы льдинок и эти образования, напоминающие групповые соединения в виде снежинок, достигающие высот до 18 км, где, как известно, наблюдается большая разреженность воздуха. Нижняя же часть грозового облака, находясь в зоне температуры $+5^{\circ}\text{C}$, при отсутствии ледяных частиц, пройдя через нижнюю температурную точку Кюри, уже переходит в сегнетоэлектрическое устойчивое состояние. В целом же поляризованное облако намагничено с постоянной напряженностью действия поля N-S.

Вывод. Для определения еще неизвестной у воды нижней температурной точки Кюри необходимо провести экспериментальные исследования на разработанном и запатентованном устройстве по созданию модели шаровой молнии, что даст возможность определить при эксперименте, по установленной величине напряженности магнитного поля, нижнюю температурную точку Кюри, а также по нижней температурной точке Кюри вычислить максимальную высоту в атмосфере, где совершаются природные явления грозообразования.

Список литературы: 1. Кузнецов М.И. Основы электротехники. Изд. "Высшая школа". – М.: 1964. – С. 19. 2. Френкель Я.И. Теория явления атмосферного электричества. – Л.-М.: Гос. издат. технико-теоретич. литературы. – 1949. – С. 68-69. 3. Кузнецов М.И. Основы электротехники. – Изд. "Высшая школа". – М. – 1964. – С. 28.

Поступила в редколлегию 16.11.2012

ВИМОГИ

до оформлення статей у Віснику Національного
технічного університету "ХПІ",
серія "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.
Теорія і практика"

Направлення (рубрики) тематичного випуску:

- електричні апарати;
- електричні машини;
- теоретичні основи електротехніки;
- сильні електричні та магнітні поля;
- електричні станції і мережі;
- комп'ютерне моделювання;
- використання електротехнологій;
- пристрої та методи неруйнівного контролю;
- електричний транспорт;
- інформація, гіпотези, думки.

Оформлення основних елементів статті – за зразком нижче. Оригінал статті готується в редакторі *Microsoft Word* (2000-2003) на українській / російській мові. Формат листа – А5. Поля: низ – 25 мм, інші – по 20 мм. Між елементами статті інтервал в один порожній рядок 10 pt.

Стаття відправляється в редакцію в друкарському варіанті (1 прим.) та в електронному варіанті по E-mail або на диску (без колонтитулів і нумерації сторінок). Друкарський варіант надається на листах білого паперу формату А4 щільністю 80-90 г/м², надрукованих на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi, на одній стороні листа.

До статті додаються (по 1 прим.):

1 СУПРОВІДНИЙ ЛИСТ, де вказується направлення (рубрика), за яким рекомендується публікація статті, й перелік документів наведених нижче.

2 АКТ ЕКСПЕРТИЗИ (для громадян України) або офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн).

3 АНОТАЦІЇ РОСІЙСЬКОЮ І АНГЛІЙСЬКОЮ МОВАМИ З КЛЮЧОВИМИ СЛОВАМИ (приклад приведений нижче).

4 ДАНІ ПРО АВТОРІВ на мові статті (прізвище, ім'я, по батькові повністю, організація, посада, поштова адреса, телефон, E-mail).

5 КОПІЯ ДОКУМЕНТА ПРО ОПЛАТУ за публікацію.

Друкарські матеріали статті відправляють за адресою:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21,
м. Харків, 61002, Україна.

Оплата публікації 25 грн. – за дві сторінки А5.

Р/р 26008000074734 (UAH) в ПАТ "Укрсоцбанк", МФО
300023, код ЄРДПОУ 26450114, НТУ "ХПІ", ГО "Асоціація випуск-
ників НТУ "ХПІ" (з позначкою: "SIEMA").

Електронний варіант відправляють за адресою:

varshamova_i@rambler.ru

Довідки за телефонами:

секретар Варшамова Ірина Сергіївна, **mob. 0974604277**.

секретар Себякіна Наталія Валентинівна, **mob. 0667353882**.

УДК ... (10 pt)

В.Ф. БОЛЮХ, д.т.н., проф., НТУ "ХПІ", Харків

С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків

НАЗВА

(10 pt, жирний, вирівнювання по лівому краю з відступом 0,75 см.,
заголовні букви, без перенесень і скорочень)

Текст анотації (9 pt) на українській мові, до 5 рядків. Ключові слова.

Текст анотації (9 pt) на російській мові, до 5 рядків. Ключові слова.

Текст анотації (9 pt) на англійській мові, до 5 рядків. Ключові слова.

Вступ. У журналі публікуються результати досліджень і огляди в області електричних машин і апаратів, сильних електричних і магнітних полів, теоретичної електротехніки, електричного транспорту, світлотехніки, що не публікувалися раніше.

Мета, завдання дослідження.

Назва розділу і результати розв'язання завдання. Зміст структурується згідно вимогам постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 р. Стаття складається з розділів, назви яких відображають актуальність і стан проблеми, методи дослідження, результати теоретичних і/або експериментальних досліджень, аналіз результатів, перспективи використання.

Висновки.

Список літератури: література, електронні ресурси.

В кінці статті приводиться фото кожного автора з короткою інформацією (9 pt).

Текст оформляється шрифтом **Times New Roman** 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Абзацні відступи – 0,75 см. Назва розділу оформлюється жирними буквами.

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів в редакторі формул **Microsoft Equation**. Розміри (pt): звичайний – 10, крупний індекс – 8, дрібний індекс – 6, крупний символ – 16, дрібний символ – 10. Стиль: текст, змінна – курсив; матриця, вектор – напівжирний курсив; інші – нормальний без нахилу. Формули розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер – праворуч:

$$N = \tau_{u \max} / T_{mi} , \quad (1)$$

де $N - \dots; \tau_{u \max} - \dots; T_{mi} - \dots$.

Однакові символи в тексті і формулах повинні співпадати.

Ілюстрації (рисунок, фото, діаграми) і *таблиці* (9 pt) оформлюються за зразком без назв, всі пояснення – в тексті. Рисунок оформлюється в редакторі **Microsoft Word** як окремі об'єкти в тексті. Рисунок та таблицю відокремлюються від тексту інтервалом в один порожній рядок 10 pt.

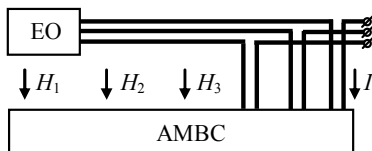


Рис. 1 – Структурна схема вимірювань поля.

Таблиця 1 – Вимоги щодо оформлення таблиці

Поле ліворуч	20 мм
Поле праворуч	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Список літератури оформляється за зразком, згідно стандарту ДСТУ 7.1-2006.

Посилання на математичні формули, ілюстрації, таблиці, джерела інформації даються за зразком: (1), (2)-(4); рис. 3, рис. 4,а; табл. 2; [5], [2-5].

Список літератури: 1. *Сосков А.Г., Соскова И.А.* Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. – К: Каравелла, 2005 – 344 с. 2. *Юферов В.Б., Егоров А.М., Шарый С.В.* и др. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний

інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – № 40. – С. 66-83.

3. Пат. 31677, Україна, МПК G01R 33/00. Пристрій для компенсації змінного магнітного моменту струмів / О.Г. Король, В.С. Лупіков, О.Г. Серeda та ін. – № u200708718. Заявлено 30.06.2007. Опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8. – 3 с.

4. Бібліотека і доступність інформації у сучасному світі: електронні ресурси в науці, культурі і освіті / Л.Й. Костенко, А.О. Чекмарьов, А.Г. Бровкін, І.А. Павлуша // Бібліотечний вісник. – 2003. – № 4. – С. 43. – Режим доступу до журналу: <http://www.nbugov.ua/articles/2003/03klinko.htm>.

Фото авторів (2,5×3 см, не менше 300 dpi). Для кожного автора: прізвище, ім'я, по батькові; вчений ступінь; дати захисту дипломів і дисертацій, місце захисту; місце роботи, посада; короткий опис напрямів наукової діяльності – за розкладом, інші відомості – на розсуд автора.



Болух Владимир Федорович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.

Надійшла до редколегії 24.03.2012

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Данько В.Г., Гончаров Є.В. Використання високотемпературної надпровідності у струмообмежуючому реакторі	3
---	---

Середа А.Г., Фонта Н.Г., Моргун В.В., Березанский С.А. Повышение пожарной безопасности электроустановок собственных нужд напряжением 0,4 кВ атомных электростанций	8
--	---

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Болух В.Ф., Омар Бенаисса, Олексенко С.В. Оптимизационный подход к выбору параметров ферромагнитного сердце- чника индукционно-динамического устройства	24
---	----

Чернявская М.В., Карпалюк И.Т., Глебова М.Л. Анализ высших временных гармоник токов вентильных двигателей постоянного тока	35
--	----

Шевченко В.В. Определение критериев оценки состояния турбогенераторов для установления необходимости их замены или реабилитации	44
---	----

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Байда Е.И. Теоретический анализ возможности разгона макрообъекта электромагнитным полем	51
---	----

Горкунов Б.М., Авраменко А.А., Львов С.Г., Горкунова И.Б. Определение допустимой напряженности возбуждающего магнитного поля вихретокового преобразователя с поперечным полем	57
---	----

Захарченко С.Н. Влияние вида аппроксимирующих функций на выбор условий определения констант интегрирования при расчете переходных процессов в гранулированных токопроводящих средах	65
--	----

Резинкина М.М., Гринченко В.С. Экспериментальное исследование распределения магнитной индукции трехфазного токопровода при наличии электропроводных пластин	75
---	----

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Чапыгин Е.А., Трунова И.С. Исследование зависимости коэффициента передачи энергии от индуктивной нагрузки в согласующих устройствах цилиндрического типа	82
--	----

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ ТА МЕРЕЖІ

Карпалюк И.Т., Карюк А.А. Анализ проблем связанных с согласованием потребителей и источников питания по основным показателям качества электрической энергии	95
---	----

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Акимов Л.В., Литвиненко Д.Г.

Оптимизация двухкратноинтегрирующей системы вектрного управления асинхронным электроприводом с двухмассовой механической частью и нелинейной нагрузкой 99

Ткач С.А., Шведчикова И.А.

Синтез пространственных изомерных композиций многоиндукторных электромеханических систем 114

Цодик И.А., Худобин К.В.

Исследование асинхронного привода с квазичастотным управлением 124

Важинский А.И.

Управление электрическим оборудованием весового дозирования и транспортировки сыпучих материалов..... 129

Дубовенко К.В., Захаров Д.О.

Знезараження зернової продукції імпульсним коронним розрядом 139

Михайлова Л.Н.

Определение энергетических параметров электромагнитного поля для лечения мастита свиней 150

Сидорец В.Н., Бушма А.И., Жерносеков А.М., Верещаго Е.Н.

Особенности газовой защиты при импульсно-дуговой сварке..... 155

Шаповрев В.П., Себко В.В.

О возможности применения методов нанохимии для анализа и интенсификации химикотехнологических процессов..... 164

ІНФОРМАЦІЯ, ГІПОТЕЗИ, ДУМКИ

Савич Э.В.

Атмосфера Земли..... 176

Вимоги до оформлення статей 181

Наукове видання

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Збірник наукових праць

Серія
Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.
Теорія і практика

№ 61 (967) 2012

Відповідальний редактор д.т.н., проф. *Б.В. Клименко*
Технічний редактор: *Н.В. Себякіна*
Відповідальний за випуск к.т.н. *І.Б. Обухова*

Обл.-вид. № 172-12

Підп. до друку 09.12.2012 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. Riso-друк.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,9. Наклад 300 прим., 1-й з-д 1-80.
Зам. № 321. Ціна договірна.

Видавець і виконавець
Видавничий центр НТУ "ХПІ",
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.