

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**

№ 49 (955) 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. – № 49 (955). – 190 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.; С.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 техн. наук, проф.; В.А. ПУЛЯЄВ, 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. Болюх, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: О.Г. Серета, канд. техн. наук, доц.

Члени редколегії: В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; В.І. Мілих, д-р техн. наук, 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 № 7 від 06.07.2012.

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

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ
БИСТАБИЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АКТУАТОРОВ К
ИСТОЧНИКАМ ЭНЕРГИИ**

Рассмотрены математические модели электрических схем подключения актуатора вакуумного выключателя к источникам электрической энергии. Предложена схема подключения двух катушек актуатора и проанализированы результаты ее работы.

Ключевые слова: математическая модель, актуатор, вакуумный выключатель.

Введение. Одной из составляющих процесса исследования и проектирования бистабильных поляризованных актуаторов, приводящих в действие механизм вакуумных выключателей средних напряжений, является математическое моделирование работы схем подключения его катушек к источникам электрической энергии.

Цель работы. Математическое моделирование электрической цепи подключения актуатора к источникам электрической энергии и анализ полученных параметров.

Изложение основного материала. На рис.1 показана схема подключения, используемая фирмой АББ [1].

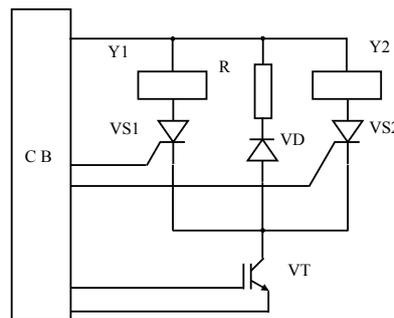


Рис. 1. Схема управления выключателем АББ, где СВ – блок управления; Y – катушки включения и отключения актуатора; VD – диод; VS – тиристоры; VT – биполярный управляемый транзистор (IGBT).

© Байда Е.И., 2012

Моделирование работы такой схемы можно легко осуществить в соответствующем прикладном пакете программ с учетом взаимной связи катушек по магнитному потоку, а результат моделирования показан на рис. 2, рис. 3.

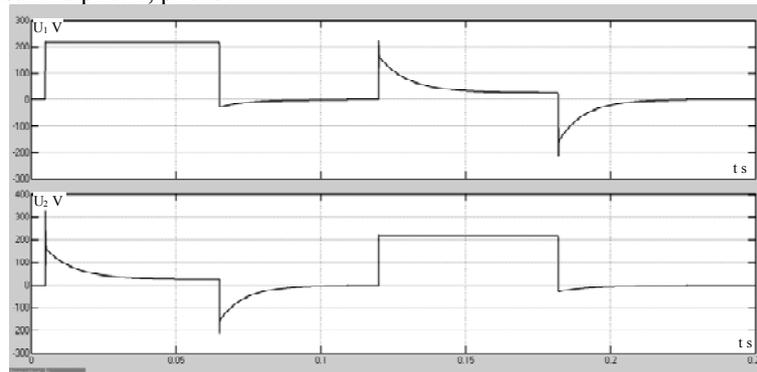


Рис.2. Напряжение на катушках бистабильного актуатора, где U_1 – напряжение на катушке включения; U_2 – напряжение на катушке отключения.

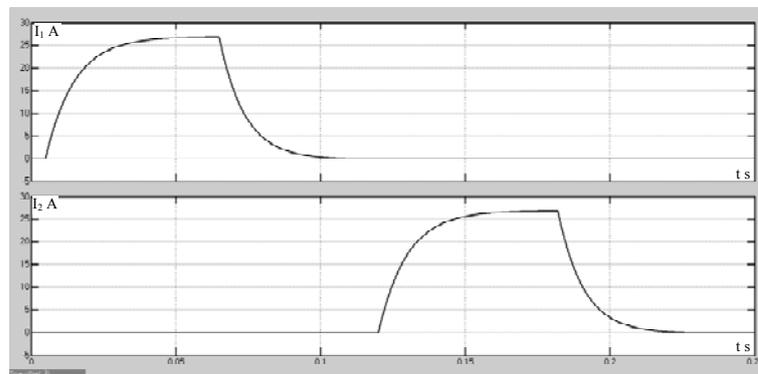


Рис.3. Значения токов катушек, где I_1 – ток катушки включения; I_2 – ток катушки отключения.

Схема рис. 1 проста, надежна в работе и широко используется в выключателях фирмы АББ. Однако, как было показано в [2], более рациональной, с точки зрения уменьшения потребления электрической энергии, является схема одновременного подключения катушек актуатора к источнику энергии, причем, катушка "отключения" подключается через добавочное сопротивление с учетом создания требуемого

направления магнитных потоков в системе. Принципиальная схема такого подключения приведена на рис. 4.

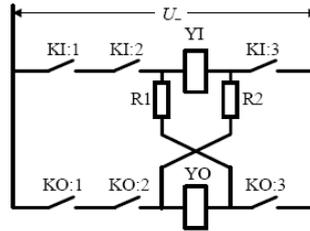


Рис.4. Принципиальная схема подключения двух катушек актуатора, где KI , KO – контакты контактора цепи управления; Y – катушки включения и отключения; R – балластные сопротивления.

Более надежным вариантом, по сравнению со схемой рис.4, является "электронный" вариант подключения катушек к блоку управления. Но наличие в схеме замкнутых контуров, охватывающих катушки, делает невозможным шунтирование катушек диодами, что приводит к появлению недопустимых кратковременных перенапряжений, выводящих из строя тиристоры и представляющих опасность для обслуживающего персонала. Поэтому, в качестве рабочей, была принята схема, показанная на рис. 5.

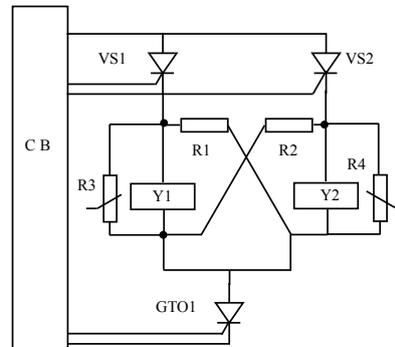


Рис. 5. Рабочая схема подключения двух катушек актуатора к источнику напряжения.

Схема, приведенная на рис. 5 отличается наличием двух нелинейных резисторов, защищающих электронные устройства от повреждения.

Результаты моделирования работы такой схемы в цикле включения-отключение, показаны на рисунках, приведенных ниже.

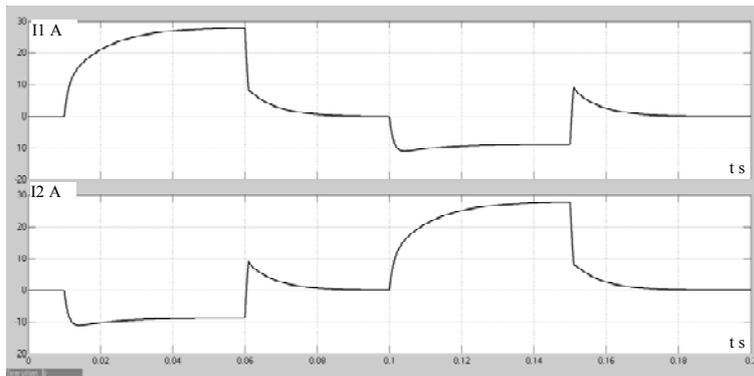


Рис. 6. Значения токов в катушках, где I_1 – ток катушки включения; I_2 – ток катушки отключения.

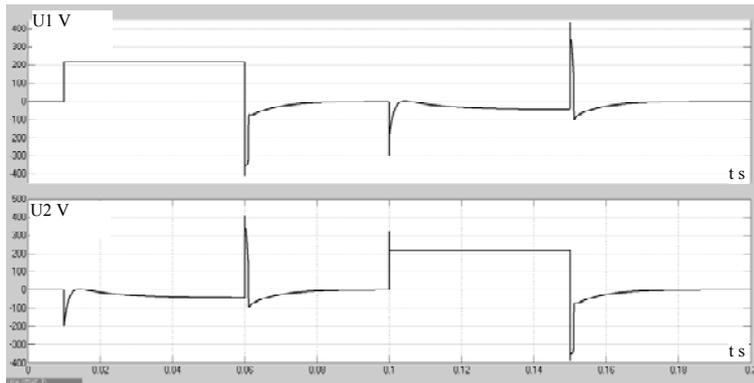


Рис. 7. Напряжения на катушках включения – U_1 и отключения – U_2 .

Результаты моделирования, проведенные в случае подключения схемы управления к накопительному конденсатору, приведены ниже.

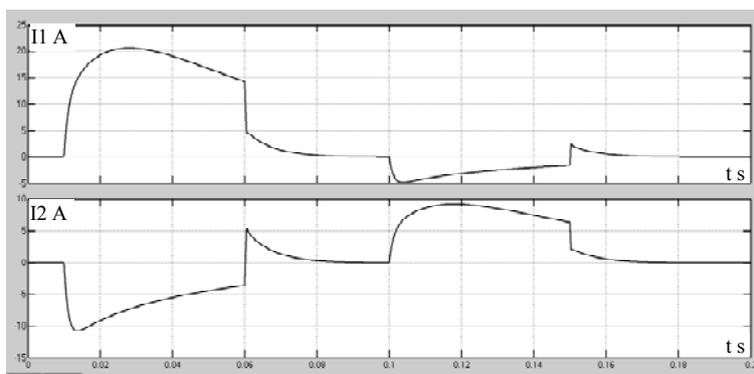


Рис.8. Токи катушек актуатора при разряде на них конденсатора, где I1 – ток катушки включения; I2 – ток катушки отключения.

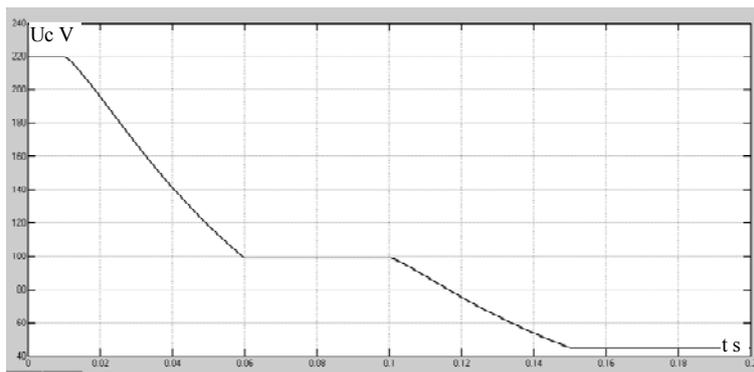


Рис.9. Изменение напряжения на конденсаторе в процессе операции включения-отключение.

Выводы. На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- математическое моделирование схем подключения катушек актуатора к источникам электрической энергии дает возможность оценить их работоспособность и подобрать значения соответствующих параметров, как это сделано на схеме (рис. 5), когда понадобилось путем вариантных расчетов подобрать значения и характеристики нелинейных сопротивлений с целью исключения перенапряжений;
- схема подключения двух катушек актуатора к источникам энергии вполне работоспособна и может быть использована в схеме управ-

ления вакуумным выключателем;

– за время порядка 40 мс (реальное время срабатывания бистабильного актуатора), происходит значительный разряд конденсатора, что затрудняет его использование в режиме О-В-О;

– накопительный конденсатор может быть использован для аварийного отключения выключателя (исчезновение напряжения цепи управления);

– в том случае, если конденсатор все же необходим (независимость управляющего напряжения от вида напряжения цепи управления), то целесообразно использовать два конденсатора – в цепи включения и в цепи отключения.

Список литературы: 1. Вакуумный выключатель с магнитным приводом типа VM1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.abb.com/product>. 2. В.М. Бугайчук. Обоснование целесообразности совместного использования обмоток включения и отключения в бистабильных электромагнитных приводах вакуумных выключателей / В.М. Бугайчук, Б.В. Клименко, В.Л. Емельянов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 4. – С. 13-15.

Надійшла до редколегії 11.10.12.

УДК 621.316.542.001

Математические модели подключения бистабильных поляризованных актуаторов к источникам энергии / Байда Е.И. // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 3-8. Бібліогр.: 2 назв.

Розглянуті математичні моделі електричних схем підключення актуатора вакуумного вимикача до джерел електричної енергії. Запропонована схема підключення двох котушок актуатора й проаналізовані результати її роботи.

Ключові слова: математична модель, актуатор, вакуумний вимикач.

Mathematical models of electric circuits for the vacuum switch actuator connection to power-supply sources are considered. A scheme of the actuator's two coils connection is proposed, results of its operation are analyzed.

Keywords: mathematical model, actuators, vacuum switch.

А.М. ГРЕЧКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В СЕРДЕЧНИКЕ МАГНИТОПРОВОДА
НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА**

В статье приведены результаты экспериментального исследования степени влияния вихревых токов в сердечнике электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения на его динамические характеристики.

Ключевые слова: вихревые токи, электромагнитный привод, вакуумный выключатель.

Введение. В большинстве практических случаях влияние вихревых токов, циркулирующих в магнитной цепи, на работу электромагнитов настолько мало, что им можно пренебречь. Однако в случае габаритных быстродействующих электромагнитных приводов (ЭМП), применяемых в качестве приводов в вакуумных выключателях среднего напряжения 6-35 кВ, вихревые токи могут оказывать существенное влияние на быстродействие ЭМП. Это приводит к увеличению времени срабатывания вакуумного выключателя, что влечет за собой увеличение термического действия тока короткого замыкания на защищаемые выключателем электрические цепи.

Известно, что действие вихревых токов направлено в сторону замедления процесса изменения магнитного потока, то есть они увеличивают как время нарастания тока в обмотке до начала движения якоря, так и во время его движения. Магнитная цепь в этом случае является как бы вторичной обмоткой, которая магнитно связана с обмоткой ЭМП (первичной обмоткой). Когда желательно иметь замедление работы электромагнитов, стремятся искусственно увеличить вихревые токи, устанавливая, например, короткозамкнутые гильзы на сердечнике электромагнита [1-3]. Наоборот, в быстродействующих электромагнитах магнитные системы выполняются из листовой трансформаторной стали с изоляцией между листами для уменьшения вихревых токов (как, например, магнитопроводы ЭМП вакуумных выключателей серии VM1 производства АВВ [4] и серии ВР1 производства РЗВА [5]). Однако такое решение усложняет процесс изготовления ЭМП, снижает его надежность и износостойкость.

© Гречко А.М., 2012

При изготовлении цельных магнитных систем аппаратов уменьшение действия вихревых токов можно достичь увеличением омического сопротивления путем введения радиальных щелей, проходящих параллельно оси сердечника [6-8].

Цель работы – экспериментальное исследование степени влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП вакуумного выключателя среднего напряжения на динамические характеристики (время включения, время отключения, время трогания при включении и отключении).

Основная часть. Для проведения экспериментального исследования по определению влияния вихревых токов на динамические характеристики ЭМП на кафедре электрических аппаратов НТУ "ХПИ" совместно с ООО "АВМ АМПЕР" (г. Кременчуг) разработаны и изготовлены опытные образцы ЭМП с цельной и разрезанной частью магнитопровода (сердечника), в разобранном виде представленный на рис. 1.



Рис. 1. Основные узлы опытных образцов ЭМП: а – с цельной частью магнитопровода (сердечника); б – с разрезанной частью магнитопровода (сердечника); 1 – корпус; 2 – сердечник; 3 – яркорь; 4 – шток; 5 – постоянные магниты; 6 – катушка.

Следует отметить, что конструкции ЭМП с разрезанным и цельным сердечниками отличались друг от друга не только наличием четырех разрезов (толщина каждого разреза составляет 3 мм, расстояние от внутреннего диаметра сердечника до начала разрезов – 5 мм), но также незначительно формой и габаритными размерами сердечника и

корпуса. Данные конструктивные изменения необходимы для проведения экспериментальных исследований ЭМП не только на опытной установке, но и при натурных испытаниях с размещением ЭМП непосредственно в корпусе серийно выпускаемого вакуумного выключателя ВБ4-Э3 [9] в испытательной лаборатории ООО "АВМ АМПЕР".

Наличие четырех разрезов в сердечнике, увеличение его внутреннего диаметра, изменение размеров корпуса, приводят к уменьшению площади рабочих зазоров, что снижает силу удержания ЭМП при притяннутом якоре и обесточенных обмотках приблизительно на 25 % (с 3700 Н до 2800 Н). По этой причине для соблюдения идентичных условий при проведении экспериментальных исследований уменьшено значение максимальной противодействующей силы с 2800 Н до 2400 Н. Для обеспечения равенства сил удержания двух исследуемых ЭМП при притяннутом якоре и обесточенных обмотках в ЭМП с цельным сердечником уменьшено количество постоянных магнитов с 24 до 20 штук. Сила удержания для данного количества постоянных магнитов составляет 2850 Н.

При проведении экспериментальных исследований в обоих ЭМП поочередно используется одна и та же двухобмоточная катушка со следующими обмоточными данными: $R_{\text{вкл}} = 8 \text{ Ом}$, $w_{\text{вкл}} = 460$, $d_{\text{твкл}} = 0,5 \text{ мм}$, $R_{\text{откл}} = 38 \text{ Ом}$, $w_{\text{откл}} = 460$, $d_{\text{моткл}} = 0,25 \text{ мм}$, марка обмоточного провода ПЭВ-2; а также одни и те же постоянные магниты марки NQ3G ($B_r = 1,14 \text{ Тл}$; $H_c = 750 \text{ кА/м}$).

Материал магнитопровода обоих ЭМП – сталь 10895. Материал штока обоих ЭМП – сталь 12Х18Н10Т.

Экспериментальные исследования по определению влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП на его динамические характеристики проводились при варьировании параметров (емкости и напряжения) емкостного накопителя энергии (ЕНЭ)

Результаты исследований для операции включения и отключения ЭМП приведены в табл. 1, 2 соответственно и изображены на рис. 2, 3, где пунктирной линией показаны зависимости для ЭМП с разрезанным сердечником, сплошной линией – для ЭМП с цельным сердечником.

Полученные динамические характеристики ЭМП с цельным и разрезанным сердечниками при различных параметрах ЕНЭ позволяют с качественной и количественной точек зрения оценить степень влияния вихревых токов в сердечнике исследуемого ЭМП на его быстроедействие.

Значения времен трогания и срабатывания при варьировании параметров ЕНЭ для осциллограмм тока (рис. 3) сведены в табл. 3.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований по определению влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП на его динамические характеристики для операции включения

C, мкФ	U, В	Время трогания $t_{тр}$, мс		Время включения $t_{вкл}$, мс	
		с разрезами	цельный	с разрезами	цельный
2000	225	5,3	5,4	18,1	18,7
	250	4,1	4,7	16,5	17,1
	275	4,0	4,3	14,6	16,2
	300	3,7	4,0	13,5	14,8
	350	3,1	3,4	12,3	13,7
2500	225	4,6	5,0	17,8	18,2
	250	4,0	4,2	16,3	16,6
	275	3,4	4,1	14,8	16,0
	300	3,5	3,5	13,5	14,8
	350	2,7	3,1	12,3	13,5
3000	225	4,4	5,2	17,9	18,5
	250	3,9	5,1	15,7	16,1
	275	3,0	4,0	14,8	15,7
	300	2,8	3,7	13,3	14,4
	350	2,6	3,3	12,2	13,2

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований по определению влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП на его динамические характеристики для операции отключения

C, мкФ	U, В	Время трогания $t_{тр}$, мс		Время отключения $t_{откл}$, мс	
		с разрезами	цельный	с разрезами	цельный
300	100	2,4	5,3	15,2	26,7
	120	2,2	3,8	14,1	22,6
	150	1,4	2,8	12,4	18,2
	200	1,1	2,5	10,6	14,4
600	100	2,0	5,3	15,1	27,7
	120	1,6	4,0	14,6	24,2
	150	1,3	3,3	12,5	19,1
	200	1,3	2,7	10,9	14,7
900	100	2,2	5,7	15,1	22,7
	120	1,4	4,4	13,6	18,9
	150	1,1	3,7	12,0	15,5
	200	0,7	2,6	10,6	12,7
1200	100	1,3	5,6	15,2	21,0
	120	2,2	4,3	14,2	17,8
	150	1,1	3,6	11,8	15,0
	200	0,8	2,9	10,3	12,1

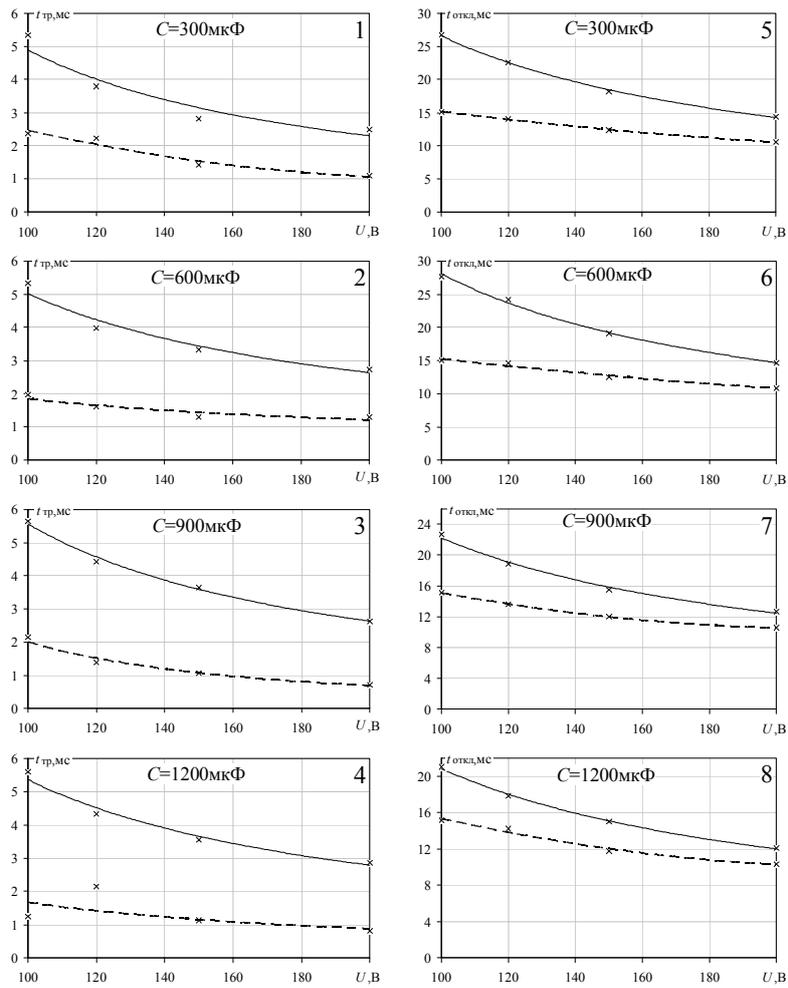


Рис. 2. Зависимость времен трогания (1-4) и срабатывания (5-8) при отключении ЭМП с разрезанным и цельным сердечниками от напряжения питания при фиксированной емкости ЕНЭ

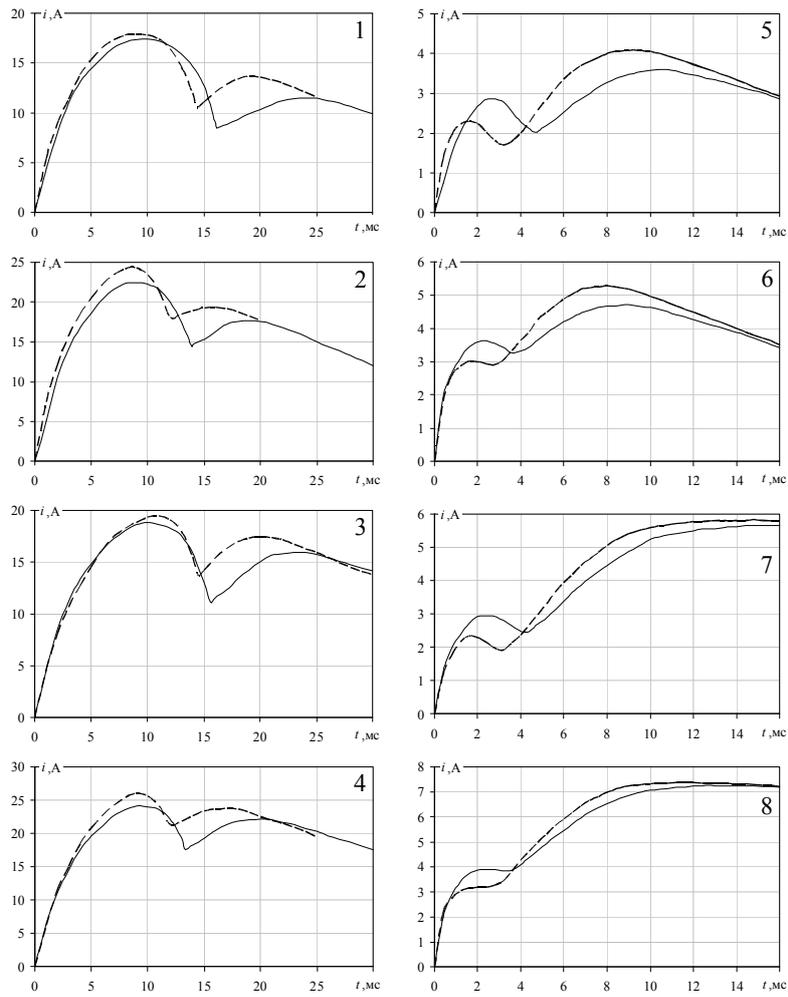


Рис. 3. Кривые изменения тока в ЭМП с разрезанным и цельным сердечниками при включении (1-4) и отключении (5-8) при различных параметрах ЕНЭ

Таблица 3 – Значения времен трогания, включения и отключения ЭМП при варьировании параметров ЕНЭ

№ осциллограммы на рис. 3	С, мкФ	U, В	$t_{тр}$, мс		$t_{сраб.}$ мс	
			с разрезами	цельный	с разрезами	цельный
1	2000	270	4,0	4,3	14,6	16,2
2	2000	350	3,1	3,4	12,3	13,7
3	3000	270	3,0	4,0	14,8	15,7
4	3000	350	2,6	3,3	12,2	13,2
5	300	270	0,9	2,2	9,0	11,2
6	300	350	0,8	2,0	8,2	9,6
7	2000	270	1,1	1,8	8,8	10,4
8	2000	350	0,8	1,6	8,0	10,0

Выводы. С помощью изготовленных опытных образцов ЭМП с цельной и разрезанной частью магнитопровода (сердечника) экспериментально установлена степень влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП на его динамические характеристики, а именно:

1. Так как магнитная система ЭМП при включении является разомкнутой, то вихревые токи в сердечнике не оказывают существенного влияния на быстродействие ЭМП. Отношения времен трогания и включения ЭМП с цельным сердечником к соответствующим временам ЭМП с разрезанным сердечником при различном напряжении и емкости ЕНЭ лежат в пределах:

- для времени трогания: 1,05-1,32;
- для времени включения: 0,9-1,06.

2. При отключении замкнутая магнитная система ЭМП является насыщенной. Поэтому вихревые токи оказывают значительное демпфирующее действие на скорость нарастания тока в обмотке до начала движения якоря, а также увеличивают время движения якоря. Отношения времен трогания и отключения ЭМП с цельным сердечником к соответствующим временам ЭМП с разрезанным сердечником при различном напряжении и емкости ЕНЭ лежат в пределах:

- для времени трогания: 1,7-4,5;
- для времени отключения: 1,2-1,8.

3. Степень влияния параметров ЕНЭ на динамические характеристики ЭМП различна. Емкость ЕНЭ не оказывает значительного влияния на времена трогания и срабатывания, как при включении, так и при отключении ЭМП. Наоборот, напряжение питания ЕНЭ существенно влияет на быстродействие ЭМП; причем с увеличением напряжения питания степень влияния вихревых токов на динамические характеристики ЭМП ослабевает.

4. При включении вихревые токи в сердечнике в зависимости от напряжения (225-350 В) и емкости (2000-3000 мкФ) ЕНЭ увеличивают время трогания в 1,05-1,32 раза, время включения – в 0,9-1,06 раза.

5. При отключении вихревые токи в сердечнике в зависимости от напряжения (100-200 В) и емкости (300-1200 мкФ) ЕНЭ увеличивают время трогания в 1,7-4,5 раза, время отключения – в 1,2-1,8 раза.

6. При окончательном выборе конструкции сердечника ЭМП и параметров ЕНЭ необходимо руководствоваться требуемыми временами срабатывания вакуумного выключателя. Для повышения быстродействия вакуумного выключателя рекомендуется выполнять сердечник ЭМП с радиальными разрезами.

Список литературы: 1. *Клименко Б.В.* Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі. Навчальний посібник / Клименко Б.В. – Харків: Талант, 2008. – 208 с. 2. *Родштейн Л.А.* Электрические аппараты / *Родштейн Л.А.* – Л.: Энергоиздат, 1981. – 304 с. 3. *Чунихин А.А.* Электрические аппараты: Общий курс / *Чунихин А.А.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с. 4. VM1. Vakuum Leistungsschalter mit Magnetantrieb. Каталог ABB 2007 [Электронный ресурс] / ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH. ABB Sace T.M.S. S.p.A. – Режим доступа: www.abb.de/calor. 5. *Мельник Я.В.* Выключатели вакуумные серии ВР. Особенности конструкции, результаты испытаний и эксплуатации / *Я.В. Мельник* // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 3. – С. 90-94. 6. *Лысов Н.Е.* Расчет электромагнитных механизмов / Лысов Н.Е. – М.: Оборонгиз, 1949. – 112 с. 7. *Клименко Б.В.* Форсированные электромагнитные системы / *Клименко Б.В.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с. 8. *Карасев В.А.* Влияние вихревых токов на переходные процессы в электромагнитах / *В.А. Карасев* // Электричество. – 1963. – № 9. – С. 33-37. 9. Выключатель вакуумный с электромагнитным приводом ВБ4-ЭЗ 10(6) кВ. Техническая информация [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.abm-amper.com/userfiles/file/ВБ4-ЭЗ каталог.pdf](http://www.abm-amper.com/userfiles/file/ВБ4-ЭЗ%20каталог.pdf). 10.



Гречко Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических аппаратов НТУ "ХПИ". Защитил диссертацию кандидата технических наук в 2009 г. в НТУ "ХПИ" по специальности "Электрические машины и аппараты". Научные интересы связаны с проблемой усовершенствования электромагнитных механизмов электрических аппаратов.

Поступила в редколлегию 16.05.2012

УДК 621.316

Экспериментальное исследование влияния вихревых токов в сер-

дечнике магнітопровода на динамические характеристики электромагнитного привода / Гречко А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 9-17. Бібліогр.: 9 назв.

У статті наведені результати експериментального дослідження ступеня впливу вихрових струмів в осерді електромагнітного привоу вакуумного вимикача середньої напруги на його динамічні характеристики.

Ключові слова: вихрові струми, електромагнітний привід, вакуумний вимикач.

In the paper results of experimental research of the degree of influence of the eddy currents in the core of the medium voltage vacuum circuit breaker electromagnetic drive on its dynamic characteristics are presented.

Key words: eddy currents, electromagnetic drive, vacuum switch.

В.Ф. БОЛЮХ, д.т.н., проф., НТУ "ХПИ"
С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспірант, НТУ "ХПИ"

**ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЯКОРЯ НА
 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИНЕЙНОГО
 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Рассмотрено влияние и зависимость эффективности линейного электро-механического преобразователя дисковой конфигурации от геометрической формы и размера якоря в зависимости от характера индуцированного в нем тока.

Ключевые слова: электро-механический преобразователь, якорь, математическое моделирование.

Введение. Линейные электро-механические преобразователи (ЛЭМП) широко используются в научно-технических системах, где необходимы импульсные механические нагрузки или высокие кинетические энергии, развиваемые на коротком участке за малое время. В ЛЭМП индукционного типа при возбуждении неподвижного индуктора от емкостного накопителя в электропроводящем якоре индуцируется ток, что приводит к возникновению электродинамических усилий (ЭДУ) и быстрому линейному перемещению якоря в сторону объекта воздействия. Рассмотрены различные массогабаритные и энергетические параметры ЛЭМП, влияющие на его эффективность. Однако вопрос об оптимальной конфигурации якоря в зависимости от характера индуцированного тока остался не исследованным [1].

Анализ литературы. ЛЭМП используются во многих отраслях науки и техники для механической обработки поверхностей, деформации и ускорения объектов, в качестве быстродействующих линейных приводов в различных системах, и т.д. Относительно низкая эффективность ЛЭМП вызвана несогласованностью электромагнитных, механических и тепловых процессов вследствие их кратковременного импульсного характера. Известны технические решения, направленные на повышение эффективности ЛЭМП (использование криогенного охлаждения, ферромагнитного сердечника, якоря специальной конфигурации, многосекционного индуктора с последовательной коммутацией и др.), которые требуют существенного усложнения конструкции с ухудшением массогабаритных показателей [2-5]. При этом не полностью использован оптимизационный подход, позволяющий избежать указанных усложнений.

© Болух В.Ф., Олексенко С.В., 2012

Под действием результирующей силы f_2 якорь перемещается вдоль оси z со скоростью $V(t)$, которую можно представить рекуррентным соотношением:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + (t_{n+1} - t_n) f_2 m_{ank}^{-1}, \quad (6)$$

где m_{ank} – общая масса ускоряемой части, включающей якорь и ускоряемый элемент.

Геометрические параметры ЛЭМП. ЛЭМП состоит из коаксиально установленных многovitковой обмотки индуктора 2, возбуждаемой аperiodическим импульсом от емкостного накопителя, массивного якоря 1 и ускоряемого элемента 3 (рис. 1).

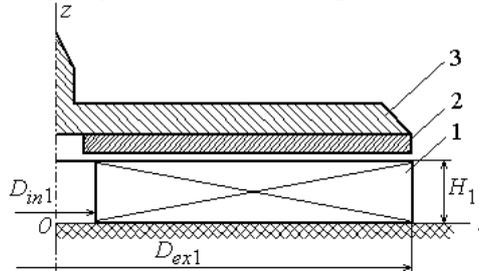


Рис. 1. Схема ЛЭМП дисковой конфигурации: 1 – якорь, 2 – индуктор, 3 – ускоряемый элемент.

Основные параметры базового варианта ЛЭМП представлены в таблице. В общем случае показателями геометрии ЛЭМП являются (рис. 2): D_{ex1} , D_{in1} – внешний и внутренний диаметр индуктора; H_1 – высота индуктора; цилиндрический якорь характеризуется: D_{ex2} , D_{in2} – соответственно, внешний и внутренний диаметр якоря; H_2 – высота якоря; dz_0 – аксиальное расстояние между индуктором и якорем; Δz , Δr – радиальная длина и высота элементарного токового элемента; $z^*(k)$ – аксиальное расстояние между нижней границей якоря и центром элементарного токового элемента; $r(k)$ – радиальное расстояние между центром индуктора (якоря) и центром элементарного токового элемента.

Введем безразмерные параметры, описывающие геометрические размеры ЛЭМП:

$$\chi = \frac{D_{in2}}{D_{ex1}}; \quad \gamma = \frac{D_{ex2}}{D_{ex1}}; \quad \varpi = \frac{D_i}{D_{ex1}}; \quad \vartheta = \frac{\int f_z(t, z) dt}{\int f_z^*(t, z) dt} \cdot 100\%.$$

Таблица – Основные параметры базового варианта ЛЭМП

Показатель	Значение
Внешний диаметр индуктора D_{ex1} , мм	100
Внутренний диаметр индуктора D_{in1} , мм	10
Высота индуктора H_1 , мм	10
Внешний диаметр якоря D_{ex2} , мм	100
Внутренний диаметр якоря D_{in2} , мм	6
Высота якоря H_2 , мм	2,5
Начальное расстояние между якорем и индуктором dz_0 , мм	1
Количество витков индуктора N_1 , шт.	46
Размер сечения витка индуктора $a \times b$, мм ²	1,8×4,8
Коэффициент упру госты пружины K_p , кН/м	7,5
Масса якоря и полезного груза m_{ank} , кг	0,354
Зарядное напряжение накопителя U_0 , В	400

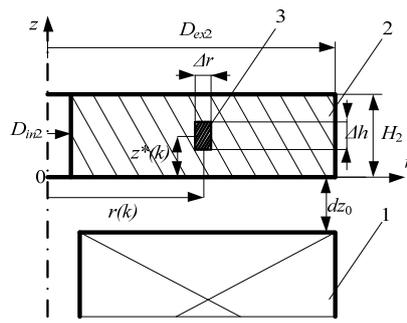


Рис. 2. Расчетная конфигурация ЛЭМП дисковой конфигурации: 1 – якорь, 2 – индуктор, 3 – элементарный токовый элемент

Влияние формы и размеров якоря на эффективность ЛЭМП

При выборе параметров якоря рассмотрим влияние его высоты, внутреннего и внешнего диаметра на КПД ЛЭМП, определяемый отношением:

$$\eta_m = \frac{m_{ank} \cdot V_m^2}{U_0 \cdot C^2} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Зависимость η_m от внешнего диаметра якоря (D_{ex2}). При изменении внешнего диаметра цилиндрического массивного якоря в диапазоне значений $\gamma = [0,3 \dots 1,8]$ наибольшие значения КПД η_m достигаются для $\gamma = 1,2$ (рис. 3). При этом изменение параметра γ от 1,2 до 1,0 не приводит к уменьшению КПД более чем на 0,5 %, что достаточно

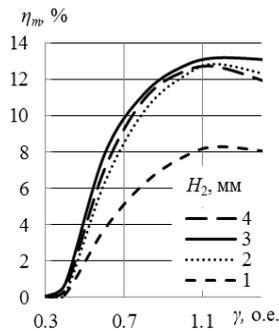


Рис. 3. Зависимость η_m ЛЭМП от внешнего диаметра якоря

цилиндрического якоря является диапазон высот $[2,5 \dots 3,5]$ мм, максимум которого достигается при значении $H_2 = 3$ мм не зависимо от внешнего диаметра (рис. 4).

При этом диапазон высот цилиндрического якоря $H_2 = [0 \dots 2,5]$ мм в наибольшей степени влияет на значение КПД ЛЭМП вследствие того, что магнитная связь между индуктором и элементарными токовыми элементами, принадлежащими этому диапазону высот, максимальна.

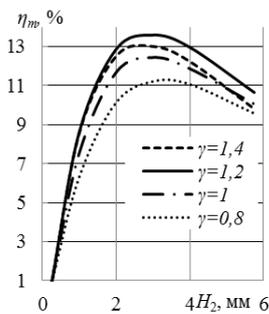


Рис. 4. Зависимость η_m ЛЭМП от высоты якоря

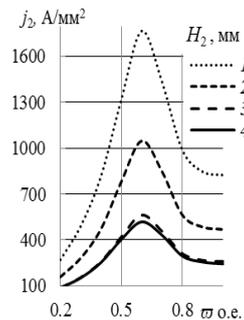


Рис. 5. Изменение средней плотности тока якоря в зависимости от его высоты

С ростом высоты массивного цилиндрического якоря средняя плотность тока в нем уменьшается (рис. 5) за счет роста числа элементарных токовых элементов, характеризующихся более низкой взаимоиндуктивностью с индуктором. Указанное свойство иллюстрирует рис. 6, на котором представлено изменение импульса силы

важно, когда ограничением размеров якоря выступает внешний диаметр индуктора.

Элементарные токовые элементы, принадлежащие диапазону радиальных расстояний $\gamma = [0,4 \dots 0,8]$ в наибольшей мере влияют на значение η_m ЛЭМП. Это объясняется тем, что плотности токов в них максимальны. При дальнейшем увеличении параметра γ более 1,2 КПД ЛЭМП падает, вследствие низкой плотности токов в дополнительных элементарных токовых элементах и высокой относительной массы.

Зависимость η_m от высоты якоря (H_2).

Наиболее эффективной высотой массивного цилиндрического якоря является диапазон высот $[2,5 \dots 3,5]$ мм, максимум которого достигается при значении $H_2 = 3$ мм не зависимо от внешнего диаметра (рис. 4).

$$F_z = \int_0^t f_z(z, t) dt \quad (8)$$

в зависимости от высоты якоря.

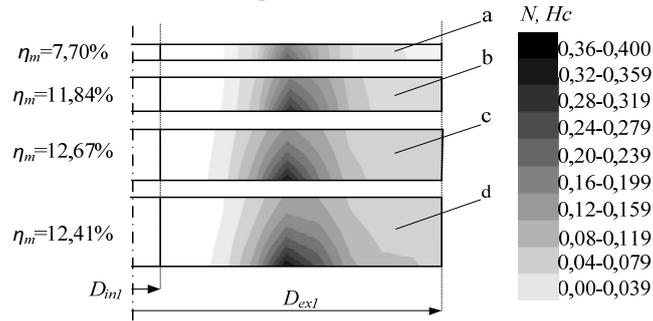


Рис. 6. КПД ЛЭМП и характер импульса силы в зависимости от высоты якоря: а – $H_2=1$ мм, б – $H_2=2$ мм, с – $H_2=3$ мм, д – $H_2=4$ мм

Зависимость η_m от внутреннего диаметра якоря (D_{in}). При выборе внутреннего диаметра якоря необходимо выбирать наименьший из возможных, однако, элементарные токовые элементы, принадлежащие диапазону радиальных расстояний $\chi=[0..0,2]$ имеют малое влияние на значение КПД ЛЭМП. Исключение последних не приводит к уменьшению эффективности ЛЭМП более чем на 0,5 % (рис. 7).

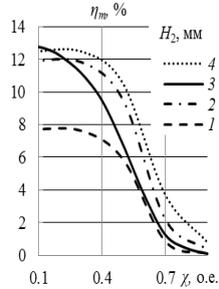


Рис. 7. Зависимость η_m ЛЭМП от внутреннего радиуса якоря

и как следствие – к росту импульса силы в оставшихся токовых элементах, которые суммарно компенсируют импульс силы, создаваемый исключенными токовыми элементами.

Геометрия якоря. Выбор конфигурации якоря ЛЭМП определяется распределением плотности тока по его сечению (рис. 8) для момента времени t при котором сила $f(t)$, действующая на якорь, максимальна.

Синтез оптимальной формы якоря предполагает, что элементарные токовые элементы, имеющие низкую плотность тока, исключаются. Это приводит к росту плотностей тока в оставшихся элементарных токовых элементах якоря (обусловленное отсутствием отрицательного влияния взаимоиндуктивности между ними), и

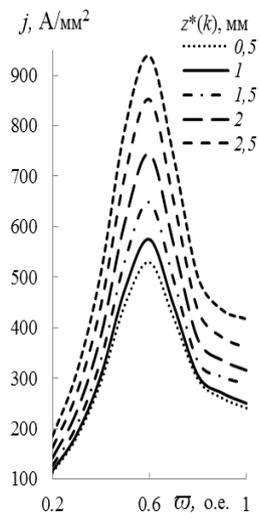


Рис. 8. Распределение плотности тока по сечению базового якоря

В случае добавления дополнительного элементарного токового происходит обратное – уменьшение средней плотности тока в других токовых элементах. Повышение эффективности ЛЭМП за счет добавления новых токовых элементов к базовому варианту не целесообразно, так как добавление на края диска якоря не эффективно, вследствие низкой плотности тока в элементарных токовых элементах этих участков. Добавление элементарных токовых элементов в центральной части диска якоря приводит к существенному уменьшению плотности тока в соседних элементарных токовых элементах. Отрицательное изменение импульса силы при этом не компенсируется вследствие низкого значения магнитной связи между ними и индуктором.

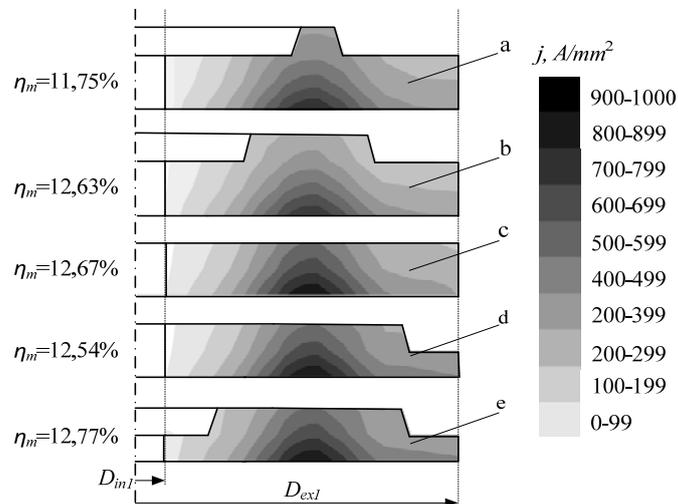


Рис. 9. КПД ЛЭМП и характер распределения индуцированного тока якоря в зависимости от его конфигурации

На рис. 9 представлено изменение распределения плотности тока по сечению якоря зависимость от его формы, в случае добавления элементарных токовых элементов (вариант а, б) к базовому якорю (вариант с) и их исключению (вариант d, e).

В результате проведения ряда расчетов было выявлено, что наиболее эффективными формами якоря являются представленные на рис. 10.

Выводы. Предложенную задачу выбора формы и размеров якоря необходимо рассматривать как многокритериальную, учитывающую различные факторы: КПД, расход активных материалов, габаритные ограничения. На основании математического моделирования установлено влияние формы якоря на эффективность ЛЭМП и выявлены оптимальные геометрические параметры.

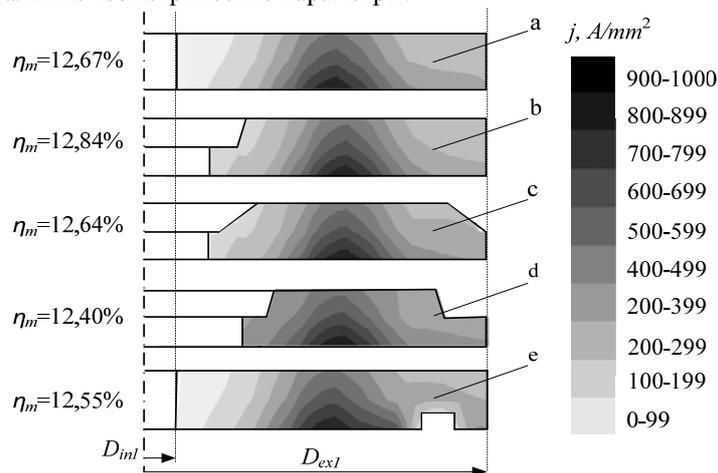


Рис. 10. КПД ЛЭМП и характер распределения индуцированного тока якоря в зависимости от его конфигурации; а – базовый якорь

Список литературы: 1. Болюх В.Ф., Назаренко С.А. Системный подход к мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия // Интегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 2. – С. 28-36. 2. Карпунин В.Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // Труды междуна. науч.техн. конф. Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития. – Самара: Изд. учеб. лит. – 2007. – С. 99-103. 3. Чемерис В.Т., Болюх В.Ф., Маисталир В.В. О возможности применения в минометах калибра 82 мм индукционного способа метания мин // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2010. – № 2. – С. 50-58. 4. Пат. України № 56568. Кріогенний імпульсний електромеханічний перетворювач індукційного типу / Болюх В.Ф.,

Любимова Л.О. № 2002076134; Заявлено 23.07.02; Надрук. 15.05.03, Бюл. № 5.
5. *Болюх В.Ф., Шукин И.С.* Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа // *Электротехника і електромеханіка*. – 2010. – № 5. – С. 5-11. 6. *Болюх В.Ф., Данишко В.Г.* Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Монографія. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – 260 с.



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.



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

Поступила в редколлегию 06.09.2012

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Влияние конфигурации якоря на эффективность линейного электромеханического преобразователя / Болюх В.Ф., Олексенко С.В. // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 18-26. Бібліогр.: 6 назв.

Розглянуто вплив і залежність ефективності лінійного електромеханічного перетворювача дискової конфігурації від геометричної форми і розміру якоря в залежності від характеру індукованого в ньому струму.

Ключові слова: електромеханічний перетворювач, якор, математичне моделювання.

The influence and dependence of the efficiency of the linear electromechanical transducer of the disk configuration on the geometrical shape and size of armature depending on the nature of the induced current in it are considered.

Keywords: electromechanical transducer, armature, mathematical modelling.

К.М. ВАСИЛІВ, д-р техн. наук, зав. кафедри ЕТС, ЛНАУ, Львів

**АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРА З
БЕЗКОНТАКТНИМ КАСКАДНИМ ТРИФАЗНИМ
МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ ЗА СХЕМОЮ В ОДНУ
ЗІРКУ І СПІЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ ФАЗ МОДУЛЯТОРА
ПІД ЧАС РОБОТИ НА АКТИВНО-ІНДУКТИВНЕ
НАВАНТАЖЕННЯ**

Методом математичного експерименту виконано дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазним модульованим збуджувачем. Проведено аналіз процесів на предмет роботопридатності системи живлення під час її роботи на активно-індуктивне навантаження.

Ключові слова: автономний генератор, електромагнітні і електромеханічні процеси, трифазний модульований збуджувач.

Вступ. Стабілізування частоти напруги в автономних системах електроживлення, для яких характерна змінна швидкість обертання ротора генератора, продовжує залишатися актуальною і важливою науково-практичною проблемою. На сьогодні наука і практика в області електромеханіки та електроенергетики пропонує низку способів стабілізування частоти напруги. Аналіз літератури показує, що один із перспективних варіантів створення АСЕЖ полягає в їх побудові на базі асинхронізованих генераторів (АСГ) з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем (БКМЗ) [5]. Такі системи не лише забезпечують практично ідеальне стабілізування частоти напруги при змінній швидкості обертання ротора генератора, але ще й відзначаються високим рівнем надійності бо належать до безконтактних.

В [5] стабілізування частоти напруги ґрунтується на принципі модуляції напруги, що дає змогу в обмотці ротора генератора отримати струм частоти ковзання, а це, своєю чергою, забезпечує постійну швидкість обертання магнітного поля стосовно обмотки статора генератора і, як наслідок, стабільну частоту напруги генератора.

Електромагнітні та електромеханічні процеси таких систем відзначаються особливою складністю.

© Василів К.М., 2012

Адже, до їх складу окрім самого генератора входять функційно пов'язані між собою дві асинхронні машини модулятора, циклоконвертор, а також застосовуються системи автоматичного керування (САК) відповідними координатами та система керування (СК) вентильним комутатором. Очевидно, що безпосередня розробка систем живлення такого типу має ґрунтуватися на всебічних ретельних теоретичних та практичних наукових дослідженнях як стосовно схемних рішень силового електричного кола, так і стосовно закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. Результати одного з таких досліджень і становлять предмет цієї статті.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні загально визнано, що математичне моделювання слугує потужним і ефективним засобом дослідження процесів, які відбуваються в електротехнічних системах. Автор протягом останніх років виконав значний обсяг робіт, пов'язаний з розробкою математичних моделей і відповідних програмних комплексів автономних систем електроживлення на базі генераторів з БКМЗ, а також проведенням досліджень за допомогою розроблених математичних моделей. Так, у [1, 2] розроблено математичні моделі автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним та трифазно-трифазним БКМЗ. Характерною особливістю цих математичних моделей є те, що в них не передбачено наявності рушія ротора генератора, що істотно обмежує їх можливості. Безумовно, що такі обмеження становили істотний недолік математичних моделей. Тому на наступному етапі були розроблені математичні моделі, які дають змогу моделювати динамічні електромагнітні та електромеханічні процеси з врахуванням наявності в моделі рушія ротора генератора [3, 4].

Мета та завдання дослідження. З теоретичного обґрунтування функціонування систем генерування на базі асинхронізованого генератора з БКМЗ відомо, що ці системи можуть формуватися за цілим сімейством схем силового електричного кола, які однозначно мають принциповий вплив на характер перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. Окрім схем силового електричного кола на перебіг цих процесів впливає вид навантаження (тобто тип споживачів), а також їх режими роботи. Тому завдання дослідження таких систем загалом полягає у вивченні закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів для кожної з можливих схем силового електричного кола (модулятора, генератора і комутатора), а також видів споживачів електроенергії їх параметрів та режимів роботи.

Задача дослідження в цій статті полягає в аналізі електромагніт-

них і електромеханічних процесів АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ зі спільним з'єднанням фаз модулятора за схемою генератора в одну зірку під час роботи на активно-індуктивне навантаження (А-ІН). Схема силового електричного кола такої системи електроживлення зображена на рис. 1.

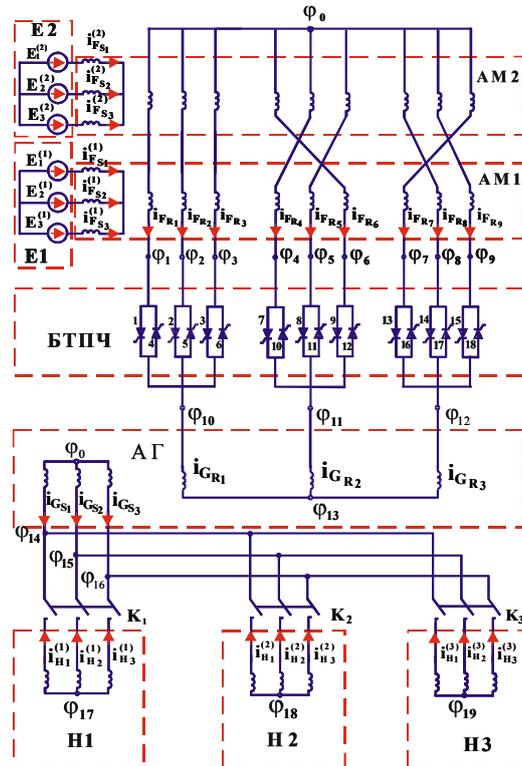


Рис. 1. Схема силового електричного кола АСЕЖ.

Виклад основного матеріалу. Отже, об'єктом дослідження є автономна система електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним БКМЗ, комутатором у якому слугує безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ) за нульовою схемою. З рис. 1 видно, що структурними елементами схеми є: дві асинхронні машини АМ1 та АМ2; джерела живлення цих машин $E1$ та $E2$ відповідно; БТПЧ; генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, фази обмотки ротора якої з'єднані в зірку. До системи живлення також

входять три споживачі (активно-індуктивні навантаження): H_1, H_2, H_3 . Ключі K_1, K_2, K_3 призначені для вмикання та відмикання споживачів. Решта позначень на схемі рис. 1 мають такий зміст. Літерами φ, i, E позначено: потенціали, струми та електрорушійні сили. Літерами F, G, H в нижніх індексах відповідно позначено належність координат до модулятора, генератора, та активно-індуктивного навантаження. Літерами S, R в нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами в нижніх індексах позначено номери електричних гілок у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 в нижньому індексі – вузли з нульовим потенціалом. Цифрами в круглих дужках (1) і т.д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до AM_1, AM_2 та джерел живлення модулятора E_1 і E_2 .

Зі схеми силового електричного кола системи живлення рис. 1 видно, що кожна з фаз обмоток роторів AM_1 та AM_2 розділені на три гілки, які з боку виходу з AM_2 і входу до AM_1 з'єднані між собою послідовно з перехрещенням фаз. Саме таке сполучення AM_1 та AM_2 утворює функційний структурний елемент, який забезпечує модуляцію напруги і тому називається модулятором. На рис. 1 також видно, що фазні гілки роторної обмотки AM_2 з'єднані в один спільний вузол, який на схемі позначено через φ_0 і який прийнято за залежний вузол дільниці схеми. Зазначимо, що цей варіант з'єднання фазних гілок роторних обмоток машин модулятора є лише одним з трьох можливих. Окрім цього варіанта загалом передбачено ще комбіноване з'єднання з розподіленням потенціалів та пофазно-групове з'єднання [4, 5].

Дослідження АСЕЖ проведено за допомогою математичної моделі, розробленої в [3] та [4], а результати розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів отримані за допомогою програмних комплексів, розроблених за алгоритмами цих математичних моделей. Суть дослідження полягає в розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів, результатом якого слугують розрахункові функціональні залежності миттєвих значень всіх визначальних координат: струмів, потенціалів та напруг, а також швидкості обертання ротора генератора та машин модулятора і їх електромагнітних моментів.

Дослідження автономної системи електроживлення проведемо для асинхронізованого генератора потужністю 100 кВт. Моделювання процесів виконаємо для режиму, в якому задане значення ковзання ротора генератора є постійним і таким, що відповідає синхронній швидкості, тобто дорівнює нулю. На початковій стадії робочого циклу АСЕЖ вмикається рушій та розганяється ротор генератора. При досяг-

ненні швидкості обертання ротора близької до синхронної вмикається напруга живлення машин модулятора, тобто вмикається збудження. На наступній стадії робочого циклу системи по чергово вмикаються три споживачі: H_1 , H_2 , H_3 , а на останньому етапі споживачі по чергово відмикаються в зворотній послідовності: H_3 , H_2 , H_1 . Протягом цілого робочого циклу функціонують САК для стабілізування швидкості обертання ротора та амплітуди фазної напруги АСГ [3, 4].

З метою вивчення функціонування системи живлення загалом і стійкості роботи комутатора зокрема під час її роботи на $R-L$ навантаження, проведемо розрахунки електромагнітних процесів для декількох різних за величиною значень активного опору та індуктивності навантаження, а також для декількох різних коефіцієнтів потужності $R-L$ навантажень. Низка попередніх досліджень показують, що ці параметри мають істотний вплив на стійкість роботи комутатора, що є визначальним для функціонування такої системи живлення в принципі.

АСЕЖ призначена для забезпечення споживача електроенергією високої якості за найважливішими параметрами, до яких належить стабільність амплітуди і частоти напруги. Про якість електроенергії за критерієм стабільності амплітуди напруги і відповідно про роботоздатність систем живлення цього типу можна робити висновок на підставі аналізу характеру розрахункових залежностей таких інтегральних координат як модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та фазних струмів ротора генератора $\mathbf{u}_{G_S}^v$, $\mathbf{i}_{G_S}^v$, \mathbf{i}_μ^v .

На рис. 2 зображені розрахункові залежності цих важливих координат, отриманих для роботи АСЕЖ на три активно-індуктивні навантаження з однаковими параметрами: $R_H^{(1)} = R_H^{(2)} = R_H^{(3)} = 10$ Ом, $L_H^{(1)} = L_H^{(2)} = L_H^{(3)} = 0,06336$ Гн, а отже коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,6$. Характер кривих цих координат відображає повний робочий цикл АСЕЖ за окремими його етапами. На першому етапі (за час від $t=0$ до $t=3$ секунди) рушій розкручує ротор генератора до синхронної швидкості. В момент часу $t=3$ сек. вмикається збудження. Тому на наступному відрізку спостерігається поява і зростання струму збудження (струму в обмотці ротора генератора) і, як наслідок, напруги статора генератора. Генератор працює в режимі неробочого ходу в діапазоні від $t=3$ до $t=5$ секунд. Починаючи з моменту часу $t=5$ секунд, через кожну секунду вмикаються споживачі в послідовності: H_1 , H_2 , H_3 . На проміжку часу від $t=7$ до $t=9$ секунд генератор працює на всі три споживачі. А, починаючи з $t=9$, споживачі вимикаються в зворотній до увімкнення послідовності: H_3 , H_2 , H_1 .

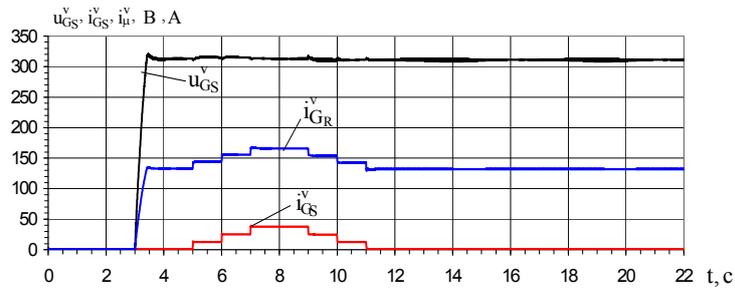


Рис. 2. $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$ – модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та струмів фазних гілок ротора генератора.

З форми кривої модуля зображувального вектора фазної напруги статора генератора видно, що амплітуда напруги є стабільною, а в області перехідних процесів, спричинених увімкненням та відмиканням споживачів, перебуває в допустимих стандартами межах відхилення від заданого значення 311 В. Вирішальну роль у забезпеченні необхідного і очікуваного характеру цих координат відіграє стійкість роботи комутатора. А це залежить від багатьох чинників, серед яких параметри машин модулятора і генератора, алгоритм і функціонування СК комутатором та САК стабілізування визначених координат, а також параметри та режими роботи споживачів. З цього рисунку також видно, що система автоматичного керування виконує свою функцію стабілізування амплітуди напруги статора генератора, а інші координати відображають поведінку системи в межах робочого циклу.

Важливу роль у функціонуванні системи збудження і АСЕЖ загалом відіграє перебіг електромагнітних процесів у модуляторі. Тому перейдемо до аналізу струмів і напруг модулятора.

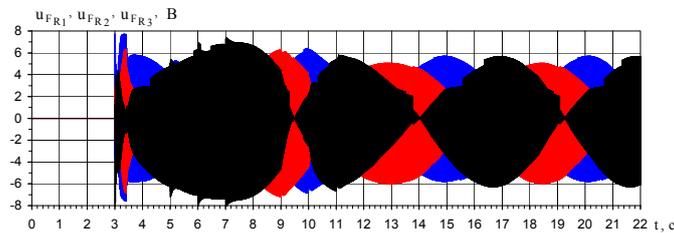


Рис. 3. Розрахункові залежності миттєвих значень напруг першої групи фазних гілок роторів машин модулятора $u_{F_{R1}}, u_{F_{R2}}, u_{F_{R3}}$.

На рис. 3 зображені розрахункові залежності від часу миттєвих значень спадів напруг першої трифазної групи фазних гілок роторів машин модулятора. З рис. 3 видно, що криві напруг мають модульовану форму з частотою ковзання і частотою заповнення, значення якої залежить від швидкості обертання ротора генератора.

Аналогічно на рис. 4 зображено розрахункові залежності миттєвих значень електричних струмів послідовно з'єднаних фазних гілок першої трифазної групи роторів машин модулятора.

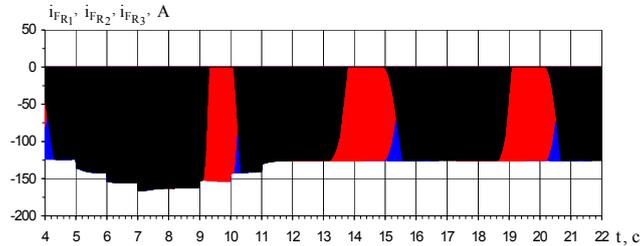


Рис. 4. i_{FR1} , i_{FR2} , i_{FR3} – миттєві струми першої трифазної групи фазних гілок роторів машин модулятора.

Криві на рис. 3 та 4 виразно відображають фізику процесів, внаслідок яких отримано електричні напруги та струми модульованої форми частоти ковзання. Як бачимо з рис. 3 та 4, на проміжку часу, де ковзання дорівнює нулю ($S=0$), спостерігаємо напруги без модуляції частотою заповнення $f_3=150$ Гц. Оскільки фазні напруги зсунуті між собою на 120° , а розгалужені фазні гілки роторів $AM1$ та $AM2$ для другої та третьої фазних груп сполучені між собою перехресно зі зсувом на 120° (див. схему рис. 1), то за частотою модуляції кожна з трьох трифазних груп напруг та струмів також зсунуті між собою на кут 120° . Амплітуди напруг і струмів змінюється залежно від зміни електрорушійних сил джерел живлення, а ця, своєю чергою, таким чином, щоб підтримувати потрібне значення струму збудження (амплітуди фазних струмів обмотки ротора генератора).

З рис. 2-4 видно, що модулятор, згідно з теоретичним передбаченнями виконує свою функцію – утворення напруг модульованої форми, необхідних для формування циклоконвертором трифазної системи струмів частотою ковзання.

Структурні елементи АСЕЖ перебувають у стані взаємного зв'язку. Тому будь-які збурення в одному з них неминуче відповідно впливають на процеси в усіх інших. У випадку цього режиму джере-

лом таких збурень слугує вмикання та відмикання споживачів. Очевидно, що напруги та струми фазних гілок роторів машин модулятора також повинні реагувати і на ці збурення. З візуального аналізу форми кривих напруг та струмів, зображених відповідно на рис. 3 та 4, виразно видно, що криві цих напруг та струмів зазнають істотного деформування яке, спричинено перехідними процесами, які, своєю чергою, виникли внаслідок ввімкнення та відімкнення навантаження. З рис. 4 видно, що амплітуда струмів фазних гілок роторів машин модулятора змінюється залежно від стану споживачів. Для ввімкненого стану струми збільшуються, а для вимкненого стану – вони зменшуються.

Визначальний вплив на перебіг процесів у таких системах та їх функціонування загалом мають процеси в обмотці збудження генератора. Тому інформація про характер електричних струмів та напруг у обмотці ротора генератора має принципово важливе значення. Проаналізуємо розрахункові залежності цих струмів, які зображені на рис. 5.

Форма кривих на цьому рисунку виразно вказує на те, що модульований перетворювач частоти дає змогу отримати високоякісні струми збудження, що слугує необхідною передумовою для отримання високоякісної напруги за критерієм гармонічного спектра. З рис. 5 також видно, що струми збудження мають частоту ковзання, а це, своєю чергою, гарантує отримання магнітного поля, яке обертається стосовно обмотки ротора з частотою ковзання, а значить з постійною частотою стосовно обмотки статора генератора. Саме це і дає змогу отримати напругу стабільної частоти за умов змінної швидкості обертання ротора генератора і саме в цьому полягає принцип функціонування систем генерування на базі БКМЗ.

Як зазначалося вище, основне завдання дослідження в цій статті полягає у вивченні закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ під час роботи на активно-індуктивне навантаження. Враховуючи те, що всі без винятку координати цієї автономної системи електроживлення перебувають у функційних взаємних зв'язках, то для вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів АСЕЖ під час її роботи на активно-індуктивне навантаження важливо з'ясувати яким є вплив параметрів $R-L$ навантаження на роботу системи. З цією метою проведено моделювання перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в зазначеній АСЕЖ для декількох значень активного опору R_H при заданому значенні $\cos \varphi$ та для декількох значень $\cos \varphi$ при постійному заданому значенні активного опору R_H . Це дало змогу вивчити вплив активного опору та коефіцієнта потужності на роботу АСЕЖ на

базі АСГ з БКМЗ під час роботи на активно-індуктивне навантаження. Очевидно, що на стійкість роботи АСЕЖ мають вплив і інші чинники: параметри електричних машин та схемні рішення.

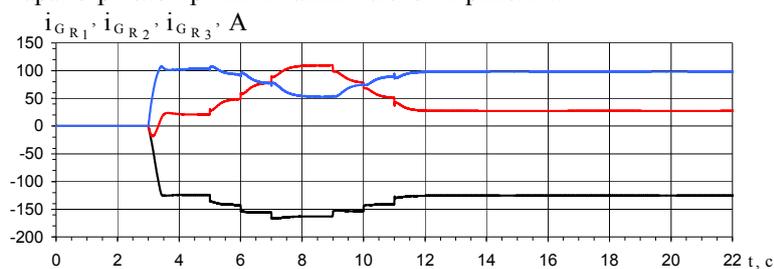


Рис. 5. $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ – миттєві струми ротора генератора.

З наведених вище результатів моделювання (рис. 2 – рис. 5) видно, що для вибраних параметрів навантаження АСЕЖ за схемою рис. 1 працює стабільно. Але при збільшенні навантаження (тобто зменшенні активного опору R_H) стійкість роботи системи порушується. Дослідження також показали, що з підвищенням коефіцієнта потужності стійкість роботи комутатора, а значить і системи живлення загалом також порушується.

На рис. 6 зображені розрахункові залежності модулів зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та струмів фазних гілок ротора генератора $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{\mu}^v$ під час роботи на активно-індуктивне навантаження з такими параметрами: $R_H=10$ Ом, $L_H=0,02387$ Гн, а отже коефіцієнтом потужності $\cos \varphi=0,8$.

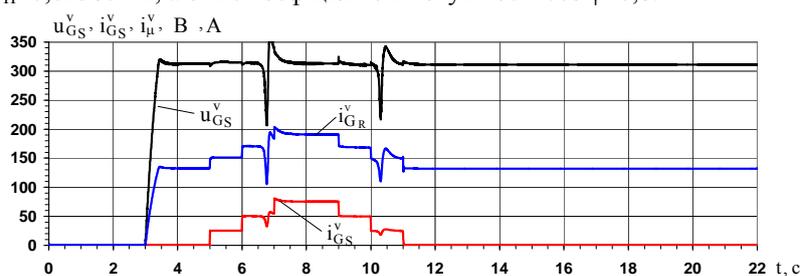


Рис. 6. $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{\mu}^v$ – модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та фазних струмів ротора генератора для навантаження: $R_H=10$ Ом, $L_H=0,02387$ Гн.

З цього рисунку видно, що характер інтегральних координат істотно змінився зі збільшенням навантаження і підвищенням коефіцієнта потужності. Судячи з рисунку, це виразно проявляється в провалах кривих напруги та струмів. Отже, на стійкість роботи комутатора і системи живлення загалом має істотний вплив інтенсивність перехідних процесів, бо збої в роботі комутатора (рис. 6) спостерігаються в околі моменту часу вмикання та вимикання споживачів.

Отримані результати дослідження АСЕЖ за схемою генератора в одну зірку і спільним з'єднанням фазних гілок ротора модулятора під час її роботи на активно-індуктивне навантаження дають підставу узагальнити думку про закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів в цій системі живлення залежно від параметрів навантаження. Ці узагальнення сформулюємо у таких висновках.

Висновки.

1. Аналіз електромагнітних та електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ за схемою генератора в одну зірку і з'єднанням фазних гілок роторних обмоток машин модулятора в один спільний вузол під час її роботи на активно-індуктивне навантаження, доводить, що принципово вона є роботопридатною.

2. На стійкість роботи комутатора і системи живлення загалом істотний вплив мають параметри активно-індуктивного навантаження.

3. Робота АСЕЖ є стійкою і стабільною для практично достатнього діапазону активно-індуктивного навантаження в області його коефіцієнта потужності до $\cos \varphi = 0,6$.

4. Стійкість функціонування системи даного класу під час її роботи на активно-індуктивне навантаження для вищих значень коефіцієнта потужності можлива за умови зменшення навантаження і навпаки.

Список літератури: 1. *Василів К.М.* Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К.М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 2. – С. 54-60. 2. *Василів К.М.* Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К.М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 50-55. 3. *Василів К.М.* Узагальнена математична модель автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем за нульовою схемою / К.М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: – 2009. – № 2. – С. 15-20. 4. *Василів К.М.* Методи і моделі аналізу процесів автономних систем електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем: дис. доктора техн. наук: 05.09.03 / Василів Карл Миколайович. – К., 2010. – 398 с. 5. *Галинов-*

ский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / Галиновский А.М. // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромехатронике. – Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. – 1997. – С. 182-192.



Василів Карл Миколайович, доктор технічних наук.

Захистив диплом інженера у Львівському політехнічному інституті в 1978 році за фахом „Електричні машини та апарати”. Дисертація кандидата технічних наук захищена в Ленінградському технічному університеті за спеціальностями: „Електричні машини” та „Електротехнічні комплекси і системи” в 1991 р., м. Санкт-Петербург, Росія. Дисертація доктора технічних наук захищена в Національному університеті біоресурсів і природокористування України за спеціальністю: „Електротехнічні комплекси і системи” в 2010 р., м. Київ.

Завідувач кафедри електротехнічних систем Львівського національного аграрного університету з 2011 року.

Наукова діяльність пов'язана з математичним моделювання електромеханічних комплексів на базі електричних машин включно з трансформаторами та вентилями перетворювачами частоти.

Поступила в редколегію 02.10.2012

УДК 621.313.333: 621.314.54: 621.316.765

Аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фаз модулятора під час роботи на активно-індуктивне навантаження / Василів К.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 27-37. Бібліогр.: 5 назв.

Методом математического эксперимента выполнено исследование электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих в автономной системе электропитания на базе асинхронизированного генератора с трехфазным модулированным возбудителем. Произведен анализ процессов на предмет работоспособности системы питания при ее работе на активно-индуктивную нагрузку.

Ключевые слова: автономный генератор, электромагнитные и электромеханические процессы, трехфазный модулированный возбудитель.

By means of mathematical experiment investigation of electromagnetic and electromechanical processes which take place in the independent electric power supply system based on an asynchronized generator with three-phase modulated exciter is carried out. The processes are analyzed to find out the working capacity level of the power supply system during its work under active-inductive load.

Keywords: independent generator, electromagnetic and electro-mechanical processes, phase modulated exciter.

М.В. ЗАГИРНЯК, д-р техн. наук, профессор, КрНУ

им. М. Остроградского, Кременчуг

Ж.И. РОМАШИХИНА, аспирант, КрНУ им. М. Остроградского,
Кременчуг

А.П. КАЛИНОВ, канд. техн. наук, доцент, КрНУ

им. М. Остроградского, Кременчуг

ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ СТЕРЖНЕЙ РОТОРА В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Проведен анализ магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя при наличии поврежденных стержней ротора после отключения машины от сети с помощью метода конечных элементов. Предложено использовать вейвлет-анализ рассчитанного в результате моделирования сигнала электродвижущей силы в обмотках статора, что позволяет определять расположение поврежденных стержней ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, метод конечных элементов, вейвлет-анализ.

Введение. Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенным видом электрических машин (ЭМ). Ежегодно выходит из строя около 20-25 % от общего количества АД. По статистике около 5 % отказов АД происходит из-за повреждений стержней ротора.

Существуют различные методы диагностики повреждений стержней ротора АД [1]. Большинство этих методов требуют выведения двигателя из рабочего процесса и его разборки. Существующие методы диагностики повреждений АД в рабочем режиме, например, методы спектрального анализа тока статора, не учитывают влияния питающей сети на результаты диагностики. При этом метод спектрального анализа тока статора не дает удовлетворительных результатов при проведении диагностики в режиме холостого хода. Кроме того, использование результатов быстрого преобразования Фурье сигналов тока не позволяет однозначно определить степень повреждения и взаимное расположение поврежденных стержней ротора.

Поэтому актуальной задачей является разработка методов, которые могут определять степень повреждения и место нахождения поврежденных стержней без вывода двигателя из технологического процесса. В последнее десятилетие в сфере диагностики АД активно используются численные методы исследования [2-3].

Как известно, математическое моделирование ЭМ с помощью классической теории поля позволяет исследовать их характеристики с использованием анализа упрощенных цепных моделей.

Численные методы анализа электромагнитного поля позволяют исследовать как установившиеся, так и динамические режимы работы ЭМ. Одним из наиболее распространенных численных методов анализа поля АД является метод конечных элементов (МКЭ).

При этом анализ установившихся режимов работы ЭМ выполняется по результатам расчета их электромагнитного поля. Анализ переходных и динамических режимов выполняется с помощью цепно-полевых математических моделей (ЦПММ). Они базируются на совместном решении дифференциальных уравнений электрических цепей обмоток и уравнений нестационарного электромагнитного поля в активной зоне ЭМ [4].

Известно, что повреждения стержней ротора приводят к искажению магнитного поля в зазоре АД. Наличие пазов на статоре и роторе АД обуславливает появление зубцовых пространственных гармоник этого поля. Зубцовые пульсации дают возможность сопоставления линий магнитного поля с геометрическим расположением зубцов.

В работе [5] для диагностики повреждений стержней ротора проводится анализ процессов в АД после его отключения от сети. Использование отключения АД позволяет избежать влияния некачественности напряжения питающей сети на результаты диагностики. После отключения двигателя от сети в обмотках статора наводится электродвижущая сила (ЭДС), обусловленная затуханием токов в обмотках вращающегося ротора. По анализу мгновенных значений ЭДС в обмотках статора фиксируются искажения магнитного поля, вызванные повреждениями стержней ротора.

При проведении экспериментальных исследований искажения магнитного поля могут быть вызваны, кроме повреждений стержней ротора, рядом других факторов: статического и динамического дисбаланса ротора, несимметрии магнитной системы и тому подобное. Поэтому для оценки влияния повреждений стержней ротора на магнитное поле АД предложено использовать математическую модель, базирующуюся на МКЭ [2-3].

Цель работы. Расчет магнитного поля асинхронного двигателя с использованием метода конечных элементов и анализ его результатов для диагностики повреждений стержней ротора по сигналу электродвижущей силы обмотки статора после отключения двигателя от сети.

Теоретические основы. Для расчета ЭДС, которая наводится в обмотках статора АД [4], используются потокосцепления этих обмоток.

Соотношение между магнитной индукцией \vec{B} и векторным магнитным потенциалом (ВМП) \vec{A} согласно уравнения Максвелла:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}. \quad (1)$$

Для расчета ЭДС в обмотках статора используется полное потокосцепление фазы обмотки:

$$\Psi_{\phi} = \frac{2l_1 w}{S_n} \int_{S_{\phi}} A_{z\Sigma} dS, \quad (2)$$

где l_1 – активная длина статора, w – количество последовательно соединенных витков в пазу, S_n – площадь сечения паза статора, $A_{z\Sigma}$ – суммарное арифметическое значение ВМП по всем пазам фазы, S_{ϕ} – суммарная площадь поперечного сечения всех последовательно соединенных катушек фазы.

Значения потокосцепления используются для определения ЭДС фазы обмотки статора по закону электромагнитной индукции:

$$e_s(t) = -\frac{d\Psi_{\phi}}{dt}. \quad (3)$$

При расчете ЭДС обмоток статора после отключения АД от сети учитывается характер затухания токов в стержнях ротора. В момент отключения двигателя от сети ($t = 0$) токи в фазах статора равны нулю. При этом соблюдается принцип постоянства потокосцеплений. Ток ротора в момент отключения АД от сети определяется выражением [6]:

$$I_{2нач} = I_{2(t=0)} + k_2 I_{1(t=0)}, \quad (4)$$

где $I_{2(t=0)}$ – ток ротора предыдущего установившегося режима в момент отключения АД от сети, k_2 – коэффициент связи ротора [6], $I_{1(t=0)}$ – ток статора предыдущего установившегося режима в момент отключения АД от сети.

В последующие моменты времени токи в стержнях ротора затухают по экспоненциальному закону с постоянной времени:

$$\tau = \frac{L_2}{R_2}, \quad (5)$$

где L_2 – индуктивность ротора, R_2 – активное сопротивление ротора.

Численное моделирование. Для исследований выбран АД типа АИР80В4У2 ($P = 1,5$ кВт, $n = 1395$ об/мин, $\eta = 0,77$, $\cos \varphi = 0,81$). Для численного расчета магнитного поля разработана модель АД, которая учитывает геометрию машины, магнитные и электрические свойства ее активных материалов.

Поверхностный эффект в двумерной постановке решения задачи магнитного поля в поперечном сечении учитывается введением граничных условий. Не учитывается скос пазов ротора. Обрыв стержня рассматривается как полное нарушение электрического контакта с короткозамыкающим кольцом ротора.

Расчет магнитного поля в поперечном сечении АД выполнен с помощью программы [7], которая позволяет решать как линейные, так и нелинейные задачи.

Для построения кривой ЭДС был проведен расчет магнитного поля АД для двух полных оборотов ротора с шагом поворота на 1 град. При этом учитывается снижение частоты вращения ротора после отключения двигателя от сети.

Расчет магнитного поля в поперечном сечении АД проведен в пакетном режиме с использованием LUA-скрипта. Набор команд, которыми определяется LUA-скрипт, может быть изменен в соответствии с задачами, которые поставлены при расчете. Полученная модель может быть использована для исследования АД любой мощности и различных динамических режимов работы, которые определяются только начальными значениями токов в пазах статора и ротора.

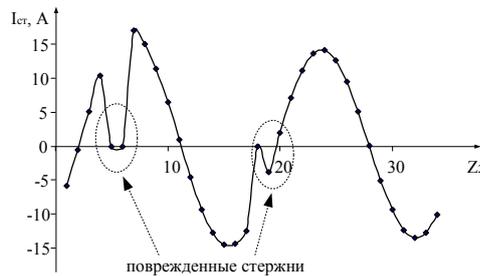


Рис. 1. Распределение токов в роторе АД с повреждениями трех стержней

Для определения токов в стержнях ротора в момент отключения двигателя от сети разработана цепная модель АД, в которой количество электрических контуров ротора соответствует количеству стержней [8].

Повреждение стержня смоделировано путем разрыва цепи в поврежденном контуре. При этом распре-

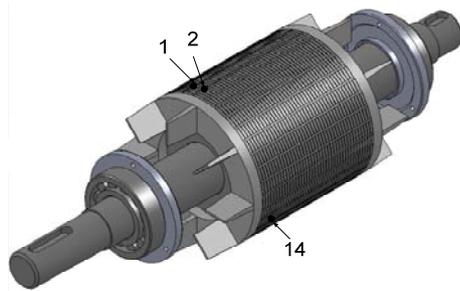


Рис. 2. Расположение поврежденных стержней на роторе АД

деление токов в стержнях неповрежденного ротора имеет вид синусоиды. При наличии повреждения ток в поврежденном стержне равен нулю, а в остальных стержнях ротора происходит перераспределение токов. Распределение токов в стержнях ротора с повреждениями трех стержней представлено на рис. 1.

Выбор номеров и расположения поврежденных стержней осуществлен в привязке к физическому исследуемому АД с искусственно внесенными повреждениями ротора. Нарушение электрической связи между стержнями выполнено с помощью высверливания отверстий в роторе (на рис. 2 они обозначены под номерами 1, 2 и 14).

Разработанная цепная математическая модель позволяет исследовать режимы работы АД с различным числом поврежденных стержней с учетом геометрического расположения повреждения. Результаты моделирования позволили получить значения токов в стержнях ротора в начальный момент отключения АД от сети. Эти значения были использованы при расчете магнитного поля АД МКЭ в режиме отключения.

В результате расчета магнитного поля после отключения АД от сети получено распределение линий магнитного потока для неповрежденного двигателя (рис. 3, а) и с повреждениями стержней ротора (рис. 3, б). Поврежденные стержни отмечены черным цветом.

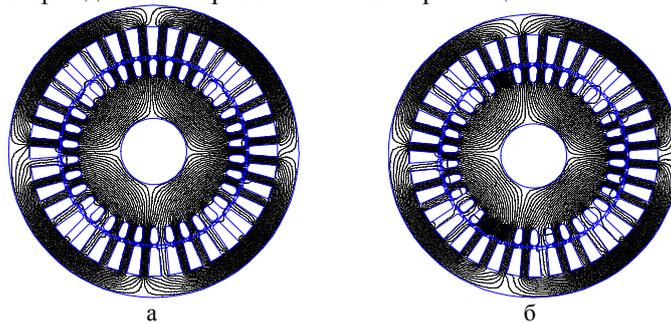


Рис. 3. Линии магнитного потока неповрежденного АД (а) и АД с повреждениями трех стержней ротора (б)

Как показывают результаты моделирования, в неповрежденном двигателе наблюдается симметричное распределение линий магнитного поля. При наличии поврежденных стержней ротора магнитное поле становится несимметричным.

Для определения диагностических критериев выполнен анализ распределения магнитного поля АД в динамическом режиме. Для оценки искажений магнитного поля используется сигнал ЭДС в обмотках статора, рассчитанный на основании выражения (3) для двух полных оборотов ротора после отключения АД от сети.

На рис. 4 показаны кривые сигналов ЭДС в обмотках статора неповрежденного АД, а также АД с повреждениями одного и трех стержней, соответственно.

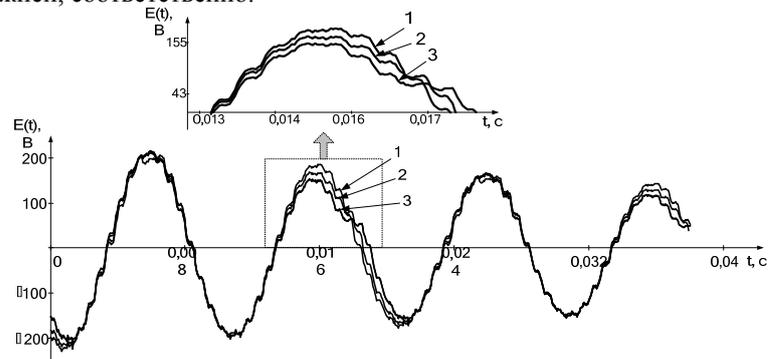


Рис. 4. Сигналы ЭДС в обмотках статора: 1 – неповрежденного АД, 2 – АД с повреждением одного стержня ротора, 3 – АД с повреждениями трех стержней ротора

Как показывают результаты расчета ЭДС в обмотках статора, из-за увеличения эквивалентного сопротивления клетки ротора амплитуда ЭДС уменьшается.

С увеличением числа поврежденных стержней на сигнале ЭДС видны некоторые искажения. Для оценки влияния повреждений стержней ротора выполнено сравнение полупериодов расчетных и аппроксимированных сигналов ЭДС в обмотках статора неповрежденного АД и АД с повреждениями (рис. 5).

Результаты сравнения показывают, что в неповрежденном АД ЭДС в обмотках статора имеет форму правильной синусоиды, модулированной высокочастотными колебаниями, которые обусловлены зубчатой конструкцией АД. При наличии повреждений в сигнале ЭДС наблюдается явное отклонение формы сигнала от синусоидальной.

Для оценки искажений на сигнале ЭДС предложено использовать вейвлет-анализ [7].

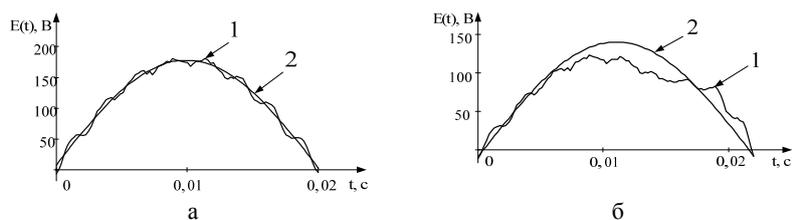


Рис. 5. Фрагменты расчетного (1) и аппроксимированного (2) сигналов ЭДС в обмотках статора неповрежденного АД (а) и АД с повреждениями трех стержней ротора (б)

Вейвлет-преобразование является обобщением спектрального анализа, однако благодаря возможности анализа, как в частотной, так и во временной областях, позволяет выполнять анализ и обработку сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве.

Были проведены исследования по выбору вейвлет-функций для вейвлет-преобразования рассчитанного сигнала ЭДС в обмотках статора. В ходе исследований установлено, что для анализа колебательных сигналов, имеющих вид синусоиды, можно использовать ортогональные вейвлеты с компактным носителем. К этим вейвлетам относятся вейвлеты Добеши, Симлета и Коифлетса [9].

Как показывают результаты исследований, на низких частотах в спектре отображается только затухающий характер сигнала. Для выявления локальных особенностей сигнала ЭДС в обмотках статора выполнен вейвлет-анализ вейвлетом Симлета третьего порядка.

На рис. 6 представлены результаты вейвлет-преобразования ЭДС в обмотках статора неповрежденного АД и АД с повреждениями одного и трех стержней ротора, соответственно.

На вейвлет-спектре сигнала ЭДС (рис. 6, а) в области высоких частот видны зубцовые гармоники, количество которых соответствует реальному числу стержней ротора. Анализ вейвлет-спектров на рис. 6,б и 6,в, показывает, что явно выраженные коэффициенты вейвлет-разложения, выделенные пунктиром, соответствуют поврежденным стержням.

Для оценки влияния повреждения ротора предложено использовать анализ значений коэффициентов вейвлет-разложения, характерных для области средних частот, на которых проявляются повреждения стержней.

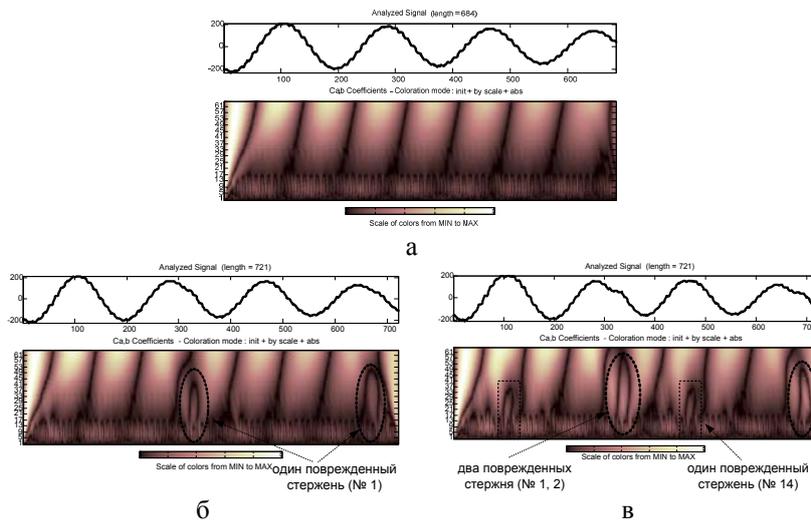


Рис. 6. Сигналы ЭДС в обмотках статора и их вейвлет-спектры для неповрежденного АД (а) и АД с повреждением одного (б) и трех (в) стержней ротора

Было предложено использовать коэффициент, представляющий собой среднее значение суммы коэффициентов вейвлет-разложения для области средних частот, который определяется выражением:

$$K = \frac{\sum_a^A k_a}{n}, \quad (6)$$

где k_a – значения коэффициентов вейвлет-разложения на выбранном масштабе, a и A – начальное и конечное значения масштаба вейвлет-спектра соответственно, n – количество коэффициентов вейвлет-разложения на выбранном масштабе.

Значения масштаба вейвлет-спектра при построении коэффициентов вейвлет-разложения были приняты в диапазоне $a = 18..32$ при максимальном значении масштабного коэффициента $a_{max} = 64$.

В соответствии с выражением (6) были построены коэффициенты вейвлет-разложения K для неповрежденного АД и АД с повреждением одного и трех стержней ротора, соответственно (рис. 7).

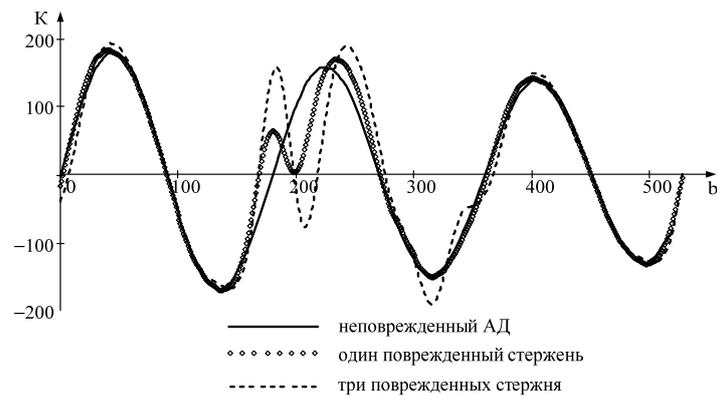


Рис. 7. Средние значения сумм коэффициентов вейвлет-разложения для неповрежденного АД и АД с повреждением одного и трех стержней ротора

Таким образом, диагностика повреждений стержней ротора АД с использованием вейвлет-преобразования сигнала ЭДС в обмотках статора после отключения АД от сети позволяет определять повреждения стержней ротора, а также взаимное расположение поврежденных стержней.

Выводы. Предложенная методика расчета электромагнитных процессов с использованием цепной модели АД и модели, базирующейся на МКЭ, позволяет оценить влияние повреждений стержней ротора на сигнал ЭДС обмотки фазы статора после отключения АД от сети.

Использование вейвлет-преобразования сигнала ЭДС в обмотках статора, полученного на основании расчета магнитного поля после отключения АД от сети, позволяет определять взаимное расположение поврежденных стержней ротора.

Список литературы. 1. Casimir R., Boutleux E., Clerc G., Chappuis F. Comparative Study of Diagnosis Methods for Induction Motor // Proc. Int. Conf. Electr. Mach. Brugge, Belgium, 2002, P. 465-470. 2. Chia-Chou Yeh, Behrooz Mirafzal, Richard J. Povinelli, Nabeel A.O. Demerdash. A Condition Monitoring Vector Database Approach for Broken Bar Fault Diagnostics of Induction Machines // IEEE, 2005, P. 29-34. 3. Nemeš M., Ambrožič V., Fišer R., Makuc D. Parameters estimation using single phase measurement of three phase induction machine // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2011, No. 3, P. 129-132. 4. Васюковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 192 с. 5. Калінов А.П., Ухань Ж.І., Урдин І.В. Метод діагностики пошко-

джен стрижнів ротора // Вісник КДПУ. 36. наук. праць КДПУ ім. М. Остроградського. – Вип. 4(57), Ч. 1. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2009. – С. 98-101. **6.** *Ivanov-Smolensky A.* Electrical Machines: – Moscow: MIR Publishers. – 1983. – 280 p. **7.** <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. **8.** *Гераскін О.А.* Вібродіагностика ушкоджень роторів потужних асинхронних двигунів на основі польових математичних моделей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. – Київ, 2011. – 18 с. **9.** *Lokenath Debnath.* Wavelet Transforms And Time-Frequency Signal Analysis. Birkhäuser Boston. – 2001.



Загирняк Михайл Васильевич, д.т.н., професор, член-корреспондент Национальной академии педагогических наук Украины, Заслуженный деятель науки и техники Украины, ректор Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.



Ромашихина Жанна Ивановна, аспірантка кафедри Систем автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.



Калинов Андрей Петрович, к.т.н., доцент кафедри Систем автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.

Поступила в редколлегию 05.09.2012

УДК 621.313

Диагностика поврежденной стержней ротора в асинхронном двигателе на основании анализа его магнитного поля / Загирняк М.В., Ромашихина Ж.И., Калинов А.П. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удоскона-

лення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 38-48. Бібліогр.: 9 назв.

Проведено аналіз магнітного поля в робочому зазорі асинхронного двигуна при наявності пошкоджень стрижнів ротора після відключення машини від мережі з використанням методу кінцевих елементів. Запропоновано здійснювати вейвлет-аналіз розрахованого в результаті моделювання сигналу електродвигової сили в обмотках статора, що дозволяє визначати розташування пошкоджених стрижнів ротора.

Ключові слова: асинхронний двигун, метод кінцевих елементів, вейвлет-аналіз.

The analysis of the magnetic field in the working gap of the induction motor in the presence of damaged rotor bars after disconnecting the machine from the network using the finite element method is carried out. It is proposed to carry out the wavelet analysis of the signal of the electromotive force in the stator windings calculated as a result of modeling that allows to determine the location of the damaged rotor bars.

Keywords: induction motor, finite element method, the wavelet analysis.

В.І. МІШИН, д-р техн. наук, проф., НУБіП України, Київ
Р.М. ЧУЄНКО, канд. техн. наук, проф., НУБіП України, Київ
С.С. МАКАРЕВИЧ, аспірантка, НУБіП України, Київ

СУМІСНА РОБОТА РІЗНОРІДНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН В АВТОНОМНОМУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

Для забезпечення умов стійкої усталеної роботи різнорідних асинхронного генератора і двигуна сумірної потужності в автономному електромеханічному комплексі запропоновано розподілення ємностей збудження машин по окремих вітках електричного кола, не пов'язаних між собою умовами ферорезонансу напруг.

Ключові слова: автономний електромеханічний комплекс, асинхронний генератор, асинхронний двигун, ємнісне збудження, ферорезонанс напруг, опір намагнічуючого контуру.

Вступ. Автономний електромеханічний комплекс (АЕК) є частковим варіантом автономної електроенергетичної системи з електричними машинами у якості джерела і споживача електроенергії. Джерелом електричної енергії у такому комплексі є синхронний генератор (СГ), а основним споживачем – асинхронний електродвигун (АД) з короткозамкнутим ротором. При 4-5 кратному форсуванні постійного струму збудження СГ забезпечується задовільний пуск та розгін АД номінальною потужністю до 0,7 від номінальної потужності СГ. Проте суміщення в одному автономному електромеханічному комплексі (АЕК) конструктивно складного та дорогого СГ із більш простим і дешевим АД не відповідає вимогам однакового ступеня надійності окремих машин у електромеханічному комплексі.

Реалізація ідеї заміни складного СГ на більш простий надійний та відносно дешевий автономний асинхронний генератор (ААГ) з короткозамкненим ротором унеможливується низкою труднощів, зумовлених загальними недоліками асинхронних машин (АМ) [1], зокрема, необхідністю окремого джерела реактивної потужності в автономній системі з ААГ.

Мета досліджень. На прикладі розрахунку і аналізу характеристик фізичної моделі автономного електромеханічного комплексу розглянемо можливості і умови сумісної роботи асинхронного генератора і двигуна сумірної потужності при різних варіантах ємнісного збудження генератора (рис. 1).

© Мішин В.І., Чуєнко Р.М., Макаревич С.С., 2012

Методика досліджень. Для об'єктивної порівняльної оцінки результатів розрахунку для всіх варіантів моделі обрано робочий АД 4А71А2 потужністю $P_H=0,75$ кВт, а єдиною базовою машиною для всіх варіантів АГ є серійна АМ 4А71В2 потужністю $P_H=1,1$ кВт. Коефіцієнт сумірності базових номінальних потужностей АД і ААГ, як і в автономному комплексі з СГ і АД, прийнятий 0,7 [4]. Вибір серії 4А базових машин обґрунтовано доступністю вихідних параметричних даних АМ [5].

В основній вихідній схемі автономного електромеханічного комплексу (рис. 1, а) прийняті базові серійні ААГ і АД з єдиним джерелом реактивної потужності для їх одночасного збудження у вигляді батареї електричних конденсаторів ємністю C , включеної у зовнішнє коло на виході генератора паралельно двигуну. При цьому загальний опір двигуна Z_o і конденсаторів відносно генератора складає $Z = \frac{-jx_c Z_o}{Z_o - jx_c}$.

При повній компенсації реактивної потужності двигуна надлишок реактивної потужності від ємності C передається генератору для його збудження. Тому опір Z зовнішнього кола відносно генератора має активно-ємнісний характер $Z=r-jx$, де знаки складових r та $(-x)$ визначають напрямки передачі відповідних потужностей: активної $rI^2=P_o$ від генератора до двигуна, реактивної $(-jxI^2)=Q_c$ від конденсаторів до генератора. ААГ є елементом двостороннього живлення, отримуючи механічну потужність (для перетворення її в активну електричну) з валу приводного двигуна, а реактивну для створення магнітних полів АМ від батареї електричних конденсаторів.

У зв'язку з малою тривалістю перехідних електромагнітних у порівнянні з електромеханічними процесами, особливо при затяжних пусках і розгоні АД з малим пусковим моментом при понижених напругах розрахунок пускових і робочих характеристик машин АЕК допустимо проводити у квазіусталеному процесі. При цьому вихідні розрахункові рівняння електричної рівноваги представляються у вигляді:

$$\text{для АД} \quad \dot{U} = -\dot{E}_{1o} + \dot{I}_{o1}Z_{1o} = \dot{I}_o Z_o, \quad 0 = -\dot{E}_{2o} + \dot{I}_{2o}Z_{2o}, \quad (1.a)$$

$$\text{для ААГ} \quad \dot{U} = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_{1o} = \dot{I}Z, \quad 0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2, \quad (1.б)$$

Розрахунок величин ЕРС і струмів двигуна та генератора, їх загальної напруги \dot{U} ведеться при заданій постійній швидкості ω_0 вала ротора, зміні ковзання робочого двигуна у діапазоні $s_{op} \leq s_o \leq 1$ при заданій ємності C , заданих [5] постійних параметрах Т-подібної схеми заміщення АМ (рис. 1, а). Змінні реактивні опори намагнічуючих контурів (x_m – генератора і x_{mo} – двигуна) задані лише побічно кривою намагнічування асинхронної машини [6] і потребують попереднього визначення.

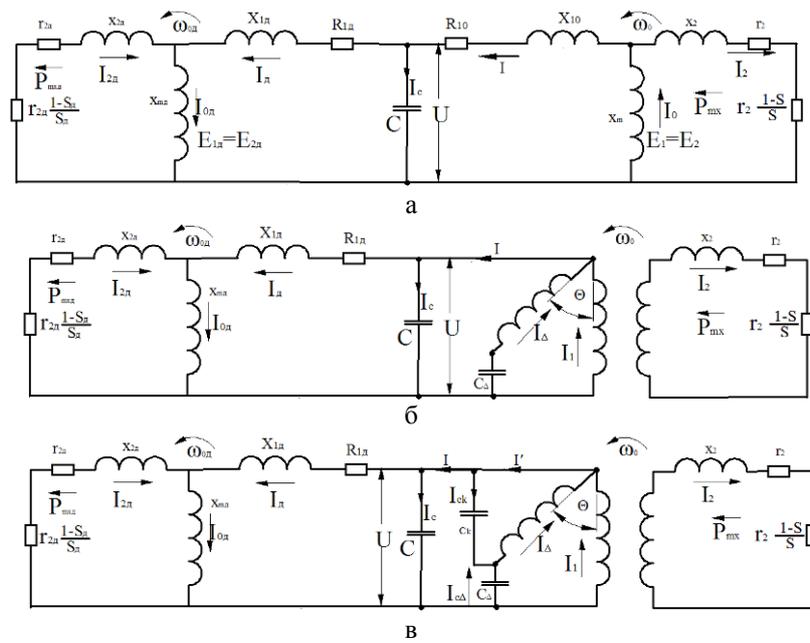


Рис. 1. Принципові електричні схеми автономного електромеханічного комплексу з асинхронними машинами: а – АД-ААГ; б – АД-КААГ; в – АД-УКААГ

Для ряду однотипних АМ певного відрізка потужностей та швидкостей обертання задається типова крива намагнічування як залежність основної ЕРС E машини від струму намагнічування I_{μ} , $E=f(I_{\mu})$ у відносних одиницях (в.о.) при діючих значеннях E та I_{μ} [3, 6]. У розрахунках вищенаведена залежність апроксимується неперервною функцією, наприклад, многочленом у вигляді $I_{\mu} = aE + bE^3 + cE^5$, де a, b, c – коефіцієнти апроксимації кривої $E=f(I_{\mu})$ [3]. На практиці найкраще використовувати залежність між основною ЕРС і опором x_m контуру намагнічування машини у вигляді квадратичної залежності $\frac{I_{\mu}}{E} = \frac{1}{x_m} = a + bE^2 + cE^4$, що представлена (рис. 2) як єдина типова крива залежності $E = \varphi(x_m)$ у в.о. для 4А71А2 та 4А71В2.

При переході до абсолютних значень E та x_m в іменованих одиницях ($E, В; x_m, Ом$) за в.о. для обох машин прийнята ЕРС E_0 ідеального холостого ходу АМ, дорівнює номінальній напрузі, $E_0 = U_n = 220 В$, а відповід-

ний її опір $x_{m0} = 249,2$ Ом для 4A71B2, $x_{m0\delta} = 337,2$ Ом для АД 4A71A2 [5].

Для визначення ЕРС E_1 (1.6), струму i , напруги U автономного асинхронного генератора необхідно задатися власними параметрами і величиною зовнішнього опору Z . Це приводить до широкої зміни опору контуру намагнічування АД, який зменшується від максимального пускового $x_{m0\delta}$ до робочого $x_{m\delta}$ ($x_{m\delta} > x_{m0\delta}$). Пояснюється це тим, що у відповідності з рівнянням електричної рівноваги обмотки статора АД його протиЕРС $E_{1\delta}$ урівноважується напругою, тому $E_{1\delta} < U$ (під час пуску АД $E_{1\delta on} \ll U$), а за кривою $E = \phi(x_{m\delta})$ (рис. 2) визначається збільшення величини опору $x_{m\delta}$ та зменшення ЕРС двигуна. У свою чергу ЕРС в основному залежить від ковзання s_δ і зменшується з його ростом. За значного пускового струму АД ЕРС $E_{1\delta}$ стрімко падає (01а), опір кола намагнічування двигуна $x_{m0\delta} \approx 580$ Ом (рис. 2), зі зменшенням ковзання до критичного $s_{\delta k}$ (рис. 2) кола намагнічування практично не змінюється і складає $x_{m\delta} \approx 560$ Ом. При подальшому розгоні АД від $s_{\delta k}$ до номінального $s_{\delta n}$ ЕРС збільшується, опір кола намагнічування АД змінюється у межах 550÷450 Ом (при цьому протиЕРС дорівнює 175-200 В). В цілому під час пуску та розгону АД $x_{m\delta}$ змінюється у обмеженому діапазоні 580÷450 Ом, а його ЕРС в АЕК визначається режимом роботи, тобто ковзанням s_δ . З рівняння (1.а) електричної рівноваги при постійному заданому s_δ ЕРС практично не залежить від зміни $x_{m\delta}$ у обмеженому діапазоні. Разом із тим ЕРС $E_{1\delta}$ та опір кола намагнічування АД $x_{m\delta}$ повинні відповідати одне одному по типовій кривій залежності $E = \phi(x_{m\delta})$ даної АМ.

У відповідності із розрахунковим методом послідовних наближень вище відмічені властивості АД дозволяють прийняти попередню величину опору кола намагнічування $x_{m\delta}$ при заданому режимі роботи (s_δ). У процесі наступних розрахунків у відповідності з величинами $E_{1\delta}$ та $x_{m\delta}$ кривої залежності $E = \phi(x_m)$ уточнюється величина $x_{m\delta}$, що за необхідністю приймається за розрахункову.

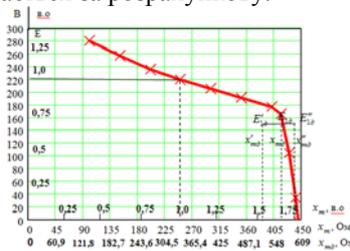


Рис. 2. Графік залежності $E = \phi(x_m)$ на основі типової кривої намагнічування асинхронної машини АИР 71В2 – x_m і АИР 71А2 – $x_{m\delta}$.

На відміну від АД, де ковзання приймається у діапазоні $s_{op} \leq s_{\delta} \leq 1$ і задає режим роботи АМ, в автономному асинхронному генераторі $s < 0$ задається складною залежністю від параметрів – власних (у тому числі і x_m) та внесених (наприклад, навантаження – АД і зовнішня ємність C). Проте залежність усіх струмів ААГ від єдиної ЕРС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$, як основного енергетичного фактора генератора дає чітке фізичне обґрунтування визначенню ковзання s та опору контуру намагнічування:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{10} + Z} = \frac{\dot{E}_2}{Z_{1r}}, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2}, \quad \dot{I}_0 = j \frac{\dot{E}_1}{x_m} \quad (2)$$

Так з умови рівноваги МРС, струмів $\dot{I} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2$ при діленні їх на $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ з (2) отримують рівняння рівноваги параметрів ААГ:

$$\frac{1}{Z_{1e}} = j \frac{1}{x_m} - \frac{1}{Z_2} \quad (3)$$

де $Z_{1e} = Z + Z_{10} = R_{1e} - jX_{1e}$ – еквівалентний опір фази комплексу при $Z_{10} = R_{10} - jX_{10}$ – власному опорі фази обмотки статора ААГ, R_{10} та X_{10} – активний та реактивний опір розсіювання [5]; $R_{1e} = r + R_{10}$; $-jX_{1e} = -jx + jX_{10}$; r , $(-jx)$ – складові опору $Z = r - jx$; $Z_2 = \frac{r_2}{s} + jx_2$ – опір фази кола ротора ААГ.

При підстановці $Z_{1e} = R_{1e} - jX_{1e}$ та Z_2 у (3), з умови рівноваги дійсної частини отримують:

$$\frac{r_2}{s} = -\frac{|Z_{1e}|^2}{2R_{1e}} \pm \sqrt{\frac{|Z_{1e}|^4}{4R_{1e}^2} - x_2^2} \quad \text{та } s < 0 \quad (4.a)$$

$$x_m = \frac{|Z_{1e}|^2 \cdot |Z_2|^2}{X_{1e} \cdot |Z_2|^2 - x_2 \cdot |Z_{1e}|^2} \quad (4.6)$$

$$\text{при } |Z_{1e}|^2 = R_{1e}^2 + X_{1e}^2; \quad |Z_2|^2 = \left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2.$$

Опір x_m визначає рівень намагнічування (збудження) ААГ. По величині x_m з кривої залежності $E = \varphi(x_m)$ для АМ 4А71В2 (рис. 2) знаходять основну ЕРС генератора, струми з (2) \dot{I} , \dot{I}_2 , \dot{I}_0 , напругу \dot{U} з (1.6), яка є робочою напругою АД.

Повернувшись до розрахунку двигуна при прийнятому ковзанні s_{δ}

визначають струм $I_{\delta} = \frac{\dot{U}}{Z_{\delta}}$, ЕРС $\dot{E}_{1\delta} = \dot{E}_{2\delta} = -\dot{U} + I_{\delta}Z_{1\delta}$, струм ротора

$$I_{2\delta} = \frac{\dot{E}_{2\delta}}{Z_{2\delta}} \text{ при } Z_{2\delta} = \frac{r_{2\delta}}{s_{\delta}} + jx_{2\delta} \text{ і обертовий електромагнітний момент}$$

$$M_{\delta} = m \frac{I_{2\delta}^2 \cdot r_{2\delta}}{\omega_{0\delta} s_{\delta}}, \text{ по якому роблять висновок з умови } M_{\delta} = (1,1 \div 1,15) M_{сн}$$

про можливість процесу пуску і розгону АД при заданому, наприклад, номінальному навантаженні $M_{сн}$ на валу.

Визначивши з рівняння електричної рівноваги ЕРС $E_{1\delta}$ двигуна 4А71А2 по кривій $E = \varphi(x_m)$ уточнюють відповідне значення опору $x_{m\delta}$. Якщо різниця отриманого значення $x_{m\delta}$ з передбачуваним $x'_{m\delta}$ складає не більше, ніж $\pm 5\%$, то $x'_{m\delta}$ залишають у якості розрахункового. При більших відхиленнях попередньо приймають два значення $x'_{m\delta}$ та $x''_{m\delta}$, для кожного з яких знаходять ЕРС $E'_{1\delta}$, $E''_{1\delta}$. Значення у точці перетину $E'_{1\delta}$, $x'_{m\delta}$ та $E''_{1\delta}$, $x''_{m\delta}$ з кривою $E = \varphi(x_m)$ (рис. 2) приймають за розрахункове $x_{m\delta}$ та $E_{1\delta}$. Відповідність їх з кривою залежності $E = \varphi(x_m)$ дає уточнене значення намагнічуючого струму I_0 , реактивної потужності Q_0 основного магнітного поля, $\cos \varphi$ АМ.

За результатами розрахунку для декількох значень s_{δ} у діапазоні $s_{\delta p} \leq s_{\delta} \leq 1$ будують зовнішню характеристику ААГ $U = f(I_{\delta})$, механічну характеристику АД $M_{\delta} = f(s_{\delta})$, що застосовуються у порівняльному аналізі з характеристиками інших варіантів автономних електромеханічних комплексів з асинхронними машинами. У розрахунку пускових і робочих характеристик АЕК з серійними асинхронними машинами ААГ-АД єдина ємність C (опір ємності x_C) для їх збудження вибирається з умови повної компенсації реактивної потужності для обох машин (повного збудження їх по основному полю і полю розсіювання) в окремих заданих режимах, наприклад, при номінальному навантаженні АД в усталеному режимі і під час пуску. Так, номінальний робочий режим АД 4А71А2 під час живлення його від ААГ 4А71В2 забезпечується при $x_C = 120$ Ом, при цьому ААГ АЕК створює напругу фази $U = 235$ В при $E_1 = 232$ В, $x_m = 206,3$ Ом, споживаючи на збудження основного потоку реактивну потужність $Q_0 = 256,6$ ВАр, а в цілому при врахуванні розсіювання $Q_{\Sigma} = 291,5$ ВАр, $\cos \varphi = 0,726$. АД споживає на фазу активну потужність $P_{\delta} = 311$ Вт, реактивну $Q_{\delta} = 122,3$ ВАр, $\cos \varphi = 0,93$, при $s_{\delta n} = 0,0565$ створюється на валу момент $M_{\delta n} = 2,54$ Нм, близький до номінального.

Зі зміною x_C у діапазоні 100÷140 Ом ААГ створює ЕРС $E_1=(248\div 208)$ В при плавній зміні $x'_{m1}=(156\div 287)$ Ом (рис. 3). АЕК працює усталено, хоча відбувається зміна напруги U і моменту $M_\delta=(3,08\div 2,1)$ на валу АД. У вище наведеному усталеному процесі при відносно малому ковзанні АД і значному опорі x_C конденсаторів реактивна складова їх загального опору $Z = r - jx$ має ємнісний характер і по величині значно перевищує індуктивні складові (X_{10}, X_2) у послідовно з'єднаному колі фази АЕК Т-подібної схеми ААГ. Зберігається значна величина ємнісного характеру і $(-jX_{1e}) = -jX + jX_{10}$ (рис. 3).

З ростом ковзання s_δ АД (при перенавантаженні) і незмінному x_C (наприклад, $x_C = 120$ Ом) відбувається зміна опорів $Z_{2\delta}, Z_\delta$, що призводить до зниження опорів Z, Z_{1e} та їх ємнісних складових $(-jx; -jx_{1e})$, наближує їх по величині з невеликими індуктивними порами обмоток генератора, у склад яких входять X_{10} статора, X_2 ротора.

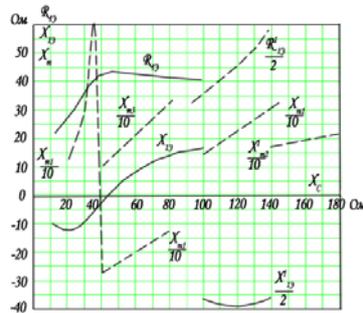


Рис. 3. Графіки залежностей активної R_{1e} , реактивної X_{1e} складових еквівалентного опору фази АЕК з АД 4А71А2 та ААГ на базі серійного АД 4А71В2 і опору x_m намагнічуючого контуру генератора від ємнісного опору x_C на виході генератора у режимі пуску АД (R_{1e}, X_{1e}, x_m при $s_\delta=1$), в усталеному процесі АД при $s_\delta=0,0565$ ($R'_{1e}, X'_{1e}, x'_{m1}$), а також $x'_{m2} = \phi(x_C)$ в усталеному процесі системи АД-КААГ при $x_{c\Delta}=70$ Ом, $x'_{m3} = \phi(x_C)$ при $x_{c\Delta}=70$ Ом, $x_{ck}=70$ Ом при пуску АД у системі АД-УКААГ

У послідовному еквівалентному колі АЕК з нелінійними феромагнітними елементами АМ і ємністю C виникає явище ферорезонансу напруг з кидками струму та моменту двигуна робочого двигуна. При цьому (4.6) величина знаменника $X_{1e} \cdot |Z_2|^2 - x_2 \cdot |Z_{1e}|^2 \rightarrow 0$ прямує до нуля і відбувається розрив функції з $x_m = \pm\infty$.

З урахуванням активних складових еквівалентного опору АЕК кидки струму, напруги обмежені за величиною, але є неприпустимими

з умов експлуатації. У прикладі, що розглядається АЕК ААГ-АД з $x_C = 120$ Ом кидки опору кола намагнічування змінюється у межах $x_m = (+1420 \div -16000)$ Ом відбуваються вже при ковзанні двигуна $s_\theta = 0,16 \div 0,18$, що по величині і знаку виводять x_m за межі типової кривої намагнічування $E = \varphi(x_m)$ і призводять порушення фізичних умов його роботи (намагнічування). До особливо важких наслідків призводять такі явища під час роботи АЕК в екстремальних умовах, наприклад, під час пуску та розгону робочого двигуна. Відомо, що значна величина його струму знижує напругу у колі з обмеженою потужністю генератора, що зменшує в свою чергу малий пусковий момент, ускладнює умови пуску і розгону двигуна. Для стабілізації рівня напруги і створення умов пуску і розгону АД необхідно застосувати за величиною ємність у 4-5 раз більшу, ніж в ustalеному робочому процесі.

Аналогічно з форсуванням збудження синхронного генератора у автономному електромеханічному комплексі з СГ-АД зазначене вище збільшення пускової ємності є також форсуванням, але ємнісного збудження АМ. Форсування збудження синхронного генератора відбувається за рахунок незначної витрати потужності постійного струму збудження (збуджує себе СГ без ємнісних елементів і віддає реактивну потужність споживачу), а отже резонансні явища у колі АЕК з СГ відсутні. У АЕК з ААГ-АД під час пуску двигуна стрімко збільшується витрата реактивної потужності змінного струму для збудження обох АМ і виробіток її загальною ємністю. Наявність у колі нелінійних АМ та електричної ємності супроводжується ймовірністю виникнення небажаних ферорезонансних явищ. Так, при $x_C = 24$ Ом процес пуску АД відбувається задовільно, момент складає $M_{on} = 3,02 \text{ Нм} \approx 1,19 M_0$, напруга $U = 180 \text{ В}$ ($E_1 = 223 \text{ В}$, $x_m = 242 \text{ Ом}$). При розгоні двигуна зі зменшенням ковзання s_θ при $x_C = \text{const}$ можуть виникати недопустимі перенапруги в АЕК, для виключення яких необхідно плавно або ступінчато зменшувати ємність C до необхідного значення в ustalеному режимі. Відхилення x_C від розрахункового значення (наприклад, x_C від 30-40 Ом при $s_{\theta n} = 1$) призводить до зменшення опору Z зовнішнього кола АЕК і його ємнісної складової з $(-jx)$ на $|-jx| \approx |jx_{10} + jx_2|$ при $x_m = \infty$ (4.б).

У випадку рівності ємнісного та індуктивного опорів еквівалентного кола створюються умови виникнення ферорезонансу напруг, який супроводжуватиметься кидками струму комплексу, моменту двигуна і призводить до порушення умов стійкої роботи автономного електромеханічного комплексу.

Критерієм та умовою стійкої спільної роботи АЕК є опір кола на-

магнічування генератора X_m , який плавно змінюється у допустимих межах ЕРС за кривою намагнічування $E=f(X_m)$. У випадку ж порушення умов стійкої спільної роботи АМ даний опір X_m за величиною і знаком виходить за межі типової кривої намагнічування $E=f(X_m)$.

Причиною виникнення резонансних явищ у колі фази АЕК є єдина для їхнього збудження ємність C , яка разом із робочим двигуном створює зовнішній активно-ємнісний опір по відношенню до активно-індуктивного опору генератора.

Засобом боротьби із негативним явищем ферорезонансу в АЕК може слугувати спосіб розподілу схем ємнісного збудження асинхронного генератора і двигуна по окремим віткам електричного кола комплексу, які не пов'язані між собою умовами резонансу напруг. Зокрема за обмеження ролі зовнішньої ємності C лише збудженням робочого двигуна, тобто за повної компенсації його реактивної потужності, їх загальний опір $Z = r - jx$ буде носити лише активний характер. Але при цьому генератор повинен мати власне незалежне збудження, наприклад, внутрішнє ємнісне збудження.

Таким умовам деякою мірою відповідає компенсований автономний асинхронний генератор (КААГ) та повністю відповідає його узагальнена модифікація – УКААГ із внутрішнім ємнісним збудженням [8].

КААГ виконується на базі тієї ж серійної трифазної АМ з короткозамкненим ротором, що і ААГ, без зміни його конструкції. При цьому фазна зона його обмотки статора 60° розділяється на дві однакові за кількістю витків частини з їх просторовим зміщенням у пазах обмотки статора одна відносно одної на 30° та включенням за схемою поворотного автотрансформатора (АТ) на внутрішню електричну ємність C_Δ (рис. 1, б).

КААГ та АД співставної потужності стійко працюють в усталеному режимі за номінального навантаження. Внутрішня ємність C_Δ не забезпечує повного збудження КААГ, а відіграє лише допоміжну роль у підвищенні ступеня жорсткості його зовнішньої характеристики. Основна ж частина збудження КААГ та повне збудження робочого АД забезпечується зовнішньою ємністю C . При цьому зберігається ємнісний характер реактивної складової повного опору $Z = r - jx$ двигуна та ємності. Тому під час пуску робочого двигуна за великої ємності C в автономній системі КААГ-АД, як і для ААГ, зберігається небезпека виникнення ферорезонансу та порушення умов стійкої роботи.

Для усунення даних явищ необхідно під час пуску та розгону робочого двигуна посилити його зовнішнє збудження та внутрішнє збудження КААГ, тобто аналогічно із синхронним генератором (СГ) здійснити форсування збудження. Але внутрішня ємність КААГ C_Δ не здатна взя-

ти на себе повне його збудження, тому для посилення збудження генератора його додаткову фазу обмотку шунтують додатковою ємністю C_k . Дана ємність C_k також може бути використана для регулювання напруги за нормального збудження та його форсування за накиду навантаження. Паралельна до додаткової обмотки генератора ємність C_k та послідовна із неї ємність C_Δ утворюють змішане збудження КААГ, а разом із зовнішньою ємністю C збудження АЕК має загальний характер. Генератор із повним комплексом ємностей збудження C, C_Δ, C_k називаємо узагальненим компенсованим автономним асинхронним генератором (УКААГ). Частковий варіант УКААГ при $X_{Ck} = \infty$ являє собою КААГ, а при $X_{C\Delta} = \infty$ та $\theta=0$ генератор стає базовим ААГ з двома співвісними паралельними вітками обмотки статора.

Для розрахунку характеристик УКААГ або його часткових варіантів складені рівняння електричної рівноваги:

$$1) \dot{U} = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jX_1 \cos \theta \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{I} Z \quad \text{— для основної обмотки}$$

2) $\dot{U} = \dot{U}_\Delta - \dot{U}_{C\Delta} = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_1 - jX_1 \cos \theta \cdot \dot{I}_1 + jX_{C\Delta} \dot{I}_{C\Delta}$ — для кола додаткової обмотки статора

3) $\dot{U}_\Delta = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_1 - jX_1 \cos \theta \cdot \dot{I}_1 = -jX_{Ck} \dot{I}_{Ck}$ — для контуру додаткової обмотки статора та ємності C_k ;

$$4) 0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad \text{— для фази обмотки ротора.}$$

На рис. 3 наведені деякі результати розрахунку характеристик під час пуску робочого АД 4А71В2 від УКААГ на базі АМ 4А71В2. Нормальний пуск робочого АД із пусковим моментом $M_{on} = 3,045 H_m = 1,2M_{on}$ відбувається при $X_C = 55$ Ом, $X_{C\Delta} = X_{Ck} = 70$ Ом за меншого ніж у комплексі ААГ+АД пускового струму (5,5 А для УКААГ та 6,9 А для КААГ), хоча і за більшої витрати реактивної потужності (1000 ВАр – УКААГ, 790 ВАр – КААГ). Але пуск робочого АД в АЕК із УКААГ на відміну від системи ААГ+АД здійснюється надійно без небезпеки зриву пускової операції.

Таку надійність забезпечують:

– розподіл ємностей збудження для АМ на три частини із розташуванням їх в окремих вітках електричного кола АЕК;

– зменшення ємності у зовнішньому колі генератора та обмеження її ролі лише збудженням двигуна;

– повне самозбудження генератора за рахунок внутрішньої ємнісної компенсації, головним чином за рахунок шунтування додаткової обмотки ємністю, чим забезпечується форсування збудження в АЕК під час пуску АД.

Висновки. На відміну від інших автономних комплексів із АМ лише комплекс УКААГ+АД виявляється працездатним у режимах пуску та розгону АД спів ставної із генератором потужності. Такий пуск здійснюється при 3-4 кратному збільшенні сумарної ємності збудження порівняно із її величиною для нормального режиму роботи. Для уникнення перезбудження та виникнення перенапруг в АЕК під час розгону АД слід переключати конденсатори для прикладу, що розглядається із варіанту УКААГ+АД із $X_C / X_{C1} / X_{Ck} = 55 / 70 / 70$ Ом на варіант КААГ+АД із $X_C / X_{C1} = 180 / 70$ Ом. Тобто зі зміною сумарної ємності збудження приблизно у 3 рази, тоді як у комплексі із ААГ+АД під час пуску АД співставної потужності необхідно збільшувати ємність збудження у 5 разів. П'яти кратним також приймається форсування збудження під час пуску АД, який отримує живлення від СГ.

Подальший розвиток АЕК із АМ може отримати шляхом заміни серійних АД на компенсовані асинхронні двигуни (КАД) [7] із підвищеним пусковим моментом, зменшеним робочим струмом та підвищеним коефіцієнтом потужності.

За простотою конструкції, ступенем надійності та вартості АЕК із компенсованими АМ може стати гідним конкурентом класичних автономних комплексів СГ+АД.

Список літератури: 1. Копылов И.П. Электрические машины / Копылов И.П. – М.: Высш. Школа, 2002. – 600 с. 2. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / Балагуров В.А. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с. 3. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи / Бессонов Л.А. – М.: Высш. школа, 1977. – 348 с. 4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / Сыромятников И.А. – М.-Л.: ГЭИ, 1963. – 528 с. 5. Асинхронные двигатели серии 4А / [Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А.]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с. 6. Мишин В.И. Моделирование аварийных режимов электродвигателей в сельском хозяйстве / Мишин В.И., Собор И.В. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 128 с. 7. Мишин В.И. Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях / В.И. Мишин, Р.Н. Чуенко, В.В. Гаврилюк // Электротехника. – 2009. – №8. – С. 30-36. 8. Мишин В.И. Автономный асинхронный генератор с внутренним емкостным возбуждением / В.И. Мишин, В.В. Каплун, С.С. Макаревич // Электротехника. – 2011. – №3. – С. 20-25.

Надійшла до редколегії 29.09.2012

УДК:621.313.322

Сумісна робота різнохідних асинхронних машин в автономному електромеханічному комплексі / Мішин В.І., Чуенко Р.М., Макаревич С.С. //

Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 49-60. Бібліогр.: 8 назв.

Для обеспечения условий устойчивой работы разнородных асинхронных генератора и двигателя соизмеримой мощности в автономном электромеханическом комплексе предложено распределение ёмкостей возбуждения машин по отдельным ветвям электрической цепи, не связанных между собой условиями феррорезонанса напряжений.

Ключевые слова: автономный электромеханический комплекс, асинхронный генератор, асинхронный двигатель, ёмкостное возбуждения, феррорезонанс напряжений, сопротивление намагничивающего контура.

To guarantee stable operation of heterogeneous induction generator and motor of commensurable power in the autonomous electromechanical complex, it is proposed to distribute capacities of the machines excitation by separate electric circuit loops which are not connected by conditions of the ferroresonance of voltages.

Keywords: autonomous electromechanical complex, induction generator, induction motor, capacitive excitation, ferroresonance of voltages, resistance of magnetizing circuit.

А.Н. ПЕТРЕНКО, инж. "СКБ Укрэлектромаш"

В.Е. ТАНЯНСКИЙ, студент

Н.Я. ПЕТРЕНКО, к.т.н., доц. НТУ "ХПИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Выполнены расчеты дополнительных электрических и магнитных потерь от высших гармоник напряжения, а также рассмотрено их влияние на нагрев отдельных узлов двигателя. Выполнен тепловой баланс источников и стоков тепла по результатам теплового расчета и определены тепловые потоки снаружи и внутри конструкции двигателя.

Ключевые слова: двигатель, дополнительные потери, высшие гармоники, тепловой баланс.

Введение. Высокий уровень зависимости отечественной экономики от внешних энергетических ресурсов и постоянный рост их цен обуславливают актуальность проблемы энергосбережения. Около 60 % вырабатываемой электроэнергии потребляется электроприводами, основным элементом которых являются асинхронные электродвигатели. Одним из наиболее эффективных способов улучшения технико-экономических показателей электроприводов является замена нерегулируемых на регулируемые электроприводы. Использование регулируемых электроприводов позволяет: разработать новые технологические процессы; решать задачи дальнейшей механизации и автоматизации производства; снизить себестоимость и повысить качество продукции; повысить энергетический коэффициент ($\eta \cdot \cos\varphi$) асинхронного двигателя. В зависимости от назначения, диапазона регулирования и мощности применяются различные типы регулируемых электроприводов. Чаще применяются регулируемые электроприводы на базе асинхронных двигателей и полупроводниковых преобразователей частоты [1].

Температурное поле и тепловые потоки двигателя. Тепловое состояние частотно-управляемых двигателей зависит от величины потерь, которые определяются величиной нагрузки, законом и коэффициентом регулирования α и от условий охлаждения. Кроме того, на тепловое состояние существенное влияние оказывает режим работы двигателя (S1...S6).

© Петренко А.Н., Таянский В.Е., Петренко Н.Я., 2012

Таким образом, тепловое состояние, т.е. распределение температуры внутри двигателя и температуры отдельных узлов двигателя являются сложной функцией пространственных координат X, Y, Z и времени t . Температурное поле двигателя определяется с одной стороны условиями эксплуатации, режимом работы, типами источников питания, величиной нагрузки, частотой вращения, с другой – конструктивными особенностями отдельных узлов и двигателя в целом [2].

Температура отдельных элементов конструкции двигателя АИР160S4 мощностью 15 кВт исследовалась при питании синусоидальным (Б) и несинусоидальным напряжением (А). Для исследования температуры использовалась математическая модель теплового состояния, которая построена на основании эквивалентной тепловой схемы. Эквивалентная тепловая схема (ЭТС) для стационарного режима работы представлена на рисунке.

Предварительные расчеты показали, что тепловые сопротивления на пути теплового потока от обмотки ротора к валу и по валу к внутреннему воздуху весьма велики, поэтому таким тепловым потоком при синусоидальном напряжении питания можно пренебречь. При ступенчатой форме питающего напряжения (ППЧ с АИН) возникают дополнительные магнитные потери и учет тепловых потоков в сердечнике ротора необходим. Конвективные тепловые сопротивления рассчитываются с помощью ЭТС для всех частот вращения диапазона регулирования двигателя. Результаты величины и распределение дополнительных потерь между элементами конструкции двигателя представлены в табл. 1.

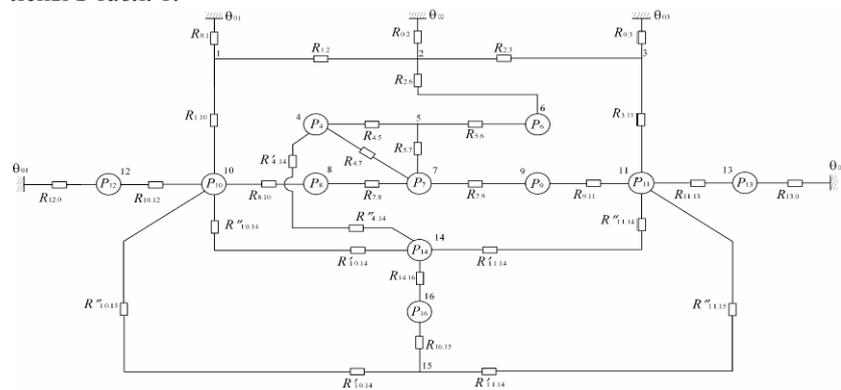


Рис. 1. ЭТС частотно-управляемого асинхронного двигателя для стационарных режимов работы

Таблица 1 – Величина дополнительных потерь в элементах конструкции двигателя от высших гармоник напряжения

Вид дополнительных потерь от ВГН	Место выделения потерь от ВГН	Величина дополнительных потерь от ВГН, Вт
Электрические потери	Пазовая часть обмотки статора	41,2
-//-	Лобовая часть обмотки статора (одна)	30,7
-//-	Обмотки ротора	211
Магнитные потери	Зубцы сердечника статора	2,1
-//-	Спинка сердечника статора	7,8
-//-	Сердечник ротора	7,4

Величина греющих потерь в зависимости от нагрузки в отдельных элементах конструкции двигателя представлены в табл.2 при питании несинусоидальным напряжением (А).

Таблица 2 – Результаты расчета греющих потерь в элементах конструкции двигателя, Вт

Часть двигателя	P ₂ , о.е.				
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
Пазовая часть обмотки статора	93,2	124,2	219,2	406,2	581,2
Лобовая часть обмотки статора (одна)	69,7	92,7	163,7	302,7	433,7
Обмотка ротора	247	305	446	680	775
Зубцы сердечника статора	84,1	94,1	102,1	118,1	139,1
Спинка сердечника статора	200,8	225,8	286,8	325,8	400,8
Сердечник статора	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
Внутренний воздух (одна полость)	31	31	31	31	31
Подшипниковый щит (один)	31	31	31	31	31

Для проверки теплового баланса источников и стоков тепла, на основании результатов теплового расчета и параметров ЭТС определены тепловые потоки с оребренного корпуса и подшипниковых щитов в окружающую среду для режима номинальной нагрузки при синусоидальной (Б) и ступенчатой (А) формах напряжения, т.е. при отсутствии и наличии дополнительных потерь от ВГН. Результаты расчета тепловых потоков с оребренного корпуса и подшипниковых щитов сведены в табл. 3. Обозначения q_{ij} взяты из ЭТС (рис. 1).

Таблица 3 – Значения тепловых потоков с оребренного корпуса и подшипниковых щитов.

$q_{i,j}$ Режим	q_{1k}	q_{2k}	q_{3k}	$q_{щ1}$	$q_{щ2}$	$\sum q_{дон}$	$\sum q$
Б, Вт	471,8	931,8	303,8	131,8	94,4	1933	1946
А, Вт	549,4	1047	326,6	155,3	112,7	2191	2247

Значения полных потерь при питании синусоидальным напряжением (режим Б) 1946 Вт, ступенчатым напряжением (режим А) 2247, Вт. Таким образом баланс истоков и стоков температуры от потерь мощности выполняется с точностью 0,9% при режиме Б и 2,5% при режиме А.

Аналогичным образом определены тепловые потоки внутри двигателя, а именно: тепловые потоки от лобовых частей обмотки статора и от ротора к внутреннему воздуху, от внутреннего воздуха к корпусу и подшипниковым щитам. Результаты расчета тепловых потоков внутри двигателя при питании синусоидальным напряжением (режим Б) и ступенчатым напряжением (режим А) сведены в табл.4. Индексы тепловых потоков i, j соответствуют номерам узлов ЭТС, изображенной на рисунке.

Таблица 4 – Значения результатов расчета тепловых потоков внутри двигателя

$q_{i,j}$ Режимы	$q_{8,10}$	$q_{9,11}$	$q_{14,10}$	$q_{14,11}$	q_{101}	$q_{11,3}$	$q_{10,12}$	$q_{11,13}$	$\sum q_{дон}$
Б, Вт	161,9	125,5	143,4	113,5	249,5	214,9	100,9	66,0	1175,6
А, Вт	173,8	133,2	200,2	166,9	301,1	265,9	124,4	82,3	1447,8

Выводы. 1. Различие тепловых потоков при синусоидальной и ступенчатой формах питающего напряжения обусловлено дополнительными электрическими потерями от высших гармоник напряжения в обмотках статора и ротора. 2. Наиболее существенно отличие тепловых потоков для обмотки ротора при ступенчатой форме напряжения и составляет 1,71, а для обмотки статора 1,11. 3. Основную роль в теплообмене выполняет примыкающая к сердечнику статора оребренная часть корпуса. 4. Отличие тепловых потоков от лобовых частей обмотки статора и ротора к внутреннему воздуху обусловлено существенной разницей условий теплообмена лобовых частей статора и ротора с внутренним воздухом со стороны вентилятора и привода. Основной причиной является значительное уменьшение коэффициента теплоот-

дачі орєбренного корпуса по его длине.

Список литературы: 1. *Локтева И.Л.* Состояние и перспективы развития регулируемого электропривода на базе автономных инверторов за рубежом / И.Л. Локтева, Г.В. Онищенко // Электротехническая промышленность. Серия 08. Электропривод, – 1986. – № 1(24). – 64 с. 2. *Осташевский Н.А.* Математическая модель теплового стану частотно-керowanego асинхронного двигателя в стационарных режимах / М.О. Осташевський, О.М. Петренко // Проблемы автоматизованого электроприводу. "Електронформ". – 2009. – С. 266-270.

Поступила в редколлегияу 10.09.2012

УДК 621.313.2

Исследование температурного поля и тепловых потоков частотно-управляемого асинхронного двигателя / А.Н. Петренко, В.Е. Танянский, Н.Я. Петренко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 61-65. Бібліогр.: 2 назв.

Наведені результати розрахунку додаткових втрат від вищих гармонік напруги та розглянуто їх вплив на нагрів окремих вузлів двигуна. Виконаний тепловий баланс джерел і стоків тепла за результатами теплового розрахунку та визначені теплові потоки зовні та в середині двигуна.

Ключові слова: двигун, додаткові втрати, вищі гармоніки, тепловий баланс.

The results of calculation of additional losses from higher harmonics of voltage are presented, their effect on heating of individual motor assemblies is considered. Heat balance of sources and sinks of heat by results of thermal calculation is carried out, heat flows outside and inside of the motor are determined.

Keywords: motor, additional losses, higher harmonics, heat balance.

А.В. ГЕТЬМАН, канд. техн. наук, Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков
А.В. КОНСТАНТИНОВ, аспирант, Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ГАРМОНИКИ СКАЛЯРНОГО ПОТЕНЦИАЛА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКОВОЙ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Рассмотрены аналитические модели магнитного поля кругового тока, однослойного соленоида и токовой цилиндрической обмотки, построенные на основе цилиндрических гармоник скалярного потенциала. Показана эквивалентность применения двух типов цилиндрических гармоник для построения модели магнитного поля цилиндрических осесимметричных источников.

Ключевые слова: модели магнитного поля, однослойный соленоид, цилиндрические осесимметричные источники.

Введение. На сегодняшний день существует большое разнообразие теоретических и эмпирических средств разработки электромагнитов [1], однако задачи об улучшении и оптимизации их характеристик являются актуальными. К таким задачам [2] относится выбор оптимальной конструкции и энергомассовых характеристик электромагнитов, используемых в качестве исполнительных органов (источников магнитного момента) в системе ориентации космического аппарата (КА). Практическое решение этой задачи усложнено большим количеством варьируемых параметров – характеристик электромагнита, что обуславливает разработку аналитической модели магнитного момента электромагнита, позволяющей проводить комплексный анализ и поиск оптимальной конструкции.

Для используемых в качестве магнитных исполнительных органов КА электромагнитов характерна конструкция в виде цилиндрической токовой обмотки содержащей внутри цилиндрический сердечник из магнитомягкого материала с большим значением магнитной проницаемости. Следует заметить, что основная часть главной рабочей характеристики такого электромагнита – магнитный момент, создается именно сердечником (более 90 %). В свою очередь для создания точной аналитической модели намагниченности и магнитного момента сердечника необходимо использование математического аппарата цилиндрических гармоник скалярного потенциала магнитного поля.

© Гетьман А.В., Константинов А.В., 2012

При этом магнитное поле токовой обмотки, индуцирующей намагниченность сердечника, также должно быть представлено на основе цилиндрических гармоник скалярного потенциала. С этой целью в работе рассмотрены аналитические модели магнитного поля токовой обмотки электромагнита на основе цилиндрических гармоник скалярного потенциала.

Исходные положения. В качестве теоретической основы модели магнитного поля токовой обмотки в работе используется представление для векторного потенциала магнитной индукции создаваемой круговым витком с током I [3]:

$$\vec{A} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{\partial \vec{L}}{|\vec{r}|}, \quad (1)$$

где \vec{r} – расстояние от элемента контура $\partial \vec{L}$ до точки наблюдения магнитной индукции.

Тогда для среды с относительной магнитной проницаемостью равной единице (в первом приближении в воздухе) для проекций напряженности магнитного поля кругового тока, аксиальная ось которого совпадает с осью аппликата, а центр витка имеет координату z^2 , справедливы выражения:

$$H_\rho = -\frac{I}{4\pi\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \int_L \frac{\partial L_\varphi}{|\vec{r}|} \right), \quad (2)$$

$$H_z = \frac{I}{4\pi\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \int_L \frac{\partial L_\varphi}{|\vec{r}|} \right), \quad (3)$$

где ρ , φ , z – цилиндрические координаты точки наблюдения магнитного поля.

Для перехода к представлению магнитного поля на основе цилиндрических гармоник используем два известных [4] выражения для обратного расстояния в цилиндрической системе координат:

$$\frac{1}{|\vec{r}|} = \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (2 - \delta_n^0) \cos n(\varphi - \varphi') \left(\int_0^{\infty} K_n(\lambda\rho) I_n(\lambda\rho') \cos \lambda(z - z') d\lambda \right), \quad (4)$$

где $I_n(\lambda\rho)$ и $K_n(\lambda\rho)$ – соответственно модифицированные функция Бесселя первого и второго рода (функция Макдональда).

Второе выражение для обратного расстояния содержит $J_n(\lambda\rho)$ –

обычные функции Бесселя:

$$\frac{1}{|\vec{r}|} = \sum_{n=0}^{\infty} (2 - \delta_n^0) \cos n(\varphi - \varphi') \left(\int_0^{\infty} J_n(\lambda \rho) J_n(\lambda \rho') e^{-\lambda |z - z'|} d\lambda \right). \quad (5)$$

Для поиска вида U – скалярного потенциала магнитного поля использовалась его связь с напряженностью магнитного поля [5, 6]:

$$\vec{H} = -\text{grad}U. \quad (6)$$

Модель на основе модифицированных функций Бесселя. Для скалярного потенциала магнитного поля кругового тока на основе (2), (3), (4), (6) в результате интегрирования по элементам замкнутого контура могут быть получены выражения:

$$U_{\text{внутри}} = -\frac{IR}{\pi} \int_0^{\infty} K_1(\lambda R) I_0(\lambda \rho) \sin(\lambda(z - z')) d\lambda, \quad \rho < R, \quad (7)$$

$$U_{\text{вне}} = \frac{IR}{\pi} \int_0^{\infty} K_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R) \sin(\lambda(z - z')) d\lambda, \quad \rho > R, \quad (8)$$

где R – радиус кругового витка с током.

Полученные соотношения (7) и (8) могут быть положены в основу модели магнитного поля бесконечнотонкого соленоида, аксиальная ось которого совпадает с осью аппликата, а координаты нижнего и верхнего торцов $-H/2$ и $+H/2$ соответственно.

При этом линейная плотность тока J соленоида может быть представлена через ток кругового витка с током dI :

$$dI = Jdz'. \quad (9)$$

Проведя интегрирование по z' для скалярного потенциала магнитного поля бесконечнотонкого соленоида получим выражения:

$$U_{\text{внутри}} = -\frac{2JR}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda} K_1(\lambda R) I_0(\lambda \rho) \sin\left(\lambda \frac{H}{2}\right) \sin(\lambda z) d\lambda, \quad \rho < R, \quad (10)$$

$$U_{\text{вне}} = \frac{2JR}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda} K_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R) \sin\left(\lambda \frac{H}{2}\right) \sin(\lambda z) d\lambda d\lambda, \quad \rho > R. \quad (11)$$

Перейдем теперь к соленоиду реальной толщины – токовой цилиндрической обмотке с внутренним радиусом R_1 и внешним радиусом R_2 . Скалярный потенциал цилиндрической обмотки с эффективной плотностью тока j , получаемой отношением полного тока I протекающего через поперечное сечение к площади сечения обмотки, может

быть записан в виде:

$$U_{внутри} = -j \int_0^{\infty} W1(\lambda R) I_0(\lambda \rho) \sin\left(\lambda \frac{H}{2}\right) \sin(\lambda z) d\lambda, \quad \rho < R1$$

$$W1(\lambda R) = \frac{2}{\pi \lambda} \int_{R1}^{R2} R K_1(\lambda R) dR = \frac{R}{\lambda^2} \left\{ K_1(\lambda R) L_0(\lambda R) + L_1(\lambda R) K_0(\lambda R) \right\} \Big|_{R1}^{R2}, \quad (12)$$

$$U_{вне} = j \int_0^{\infty} W2(\lambda R) K_0(\lambda \rho) \sin\left(\lambda \frac{H}{2}\right) \sin(\lambda z) d\lambda, \quad \rho > R2$$

$$W2(\lambda R) = \frac{2}{\pi \lambda} \int_{R1}^{R2} R K_1(\lambda R) dR = \frac{R}{\lambda^2} \left\{ I_1(\lambda R) L_0(\lambda R) - L_1(\lambda R) I_0(\lambda R) \right\} \Big|_{R1}^{R2}, \quad (13)$$

где $L_n(\lambda \rho)$ – модифицированные функции Струве.

Для области, содержащей токи ($R1 < \rho < R2$), скалярный потенциал примет вид:

$$U_{ток} = -j \int_0^{\infty} W1(\lambda \rho) I_0(\lambda \rho) \sin\left(\lambda \frac{H}{2}\right) \sin(\lambda z) d\lambda +$$

$$+ j \int_0^{\infty} W2(\lambda \rho) K_0(\lambda \rho) \sin\left(\lambda \frac{H}{2}\right) \sin(\lambda z) d\lambda,$$

$$W1(\lambda \rho) = \frac{R}{\lambda^2} \left\{ K_1(\lambda R) L_0(\lambda R) + L_1(\lambda R) K_0(\lambda R) \right\} \Big|_{R1}^{\rho} . \quad (14)$$

$$W2(\lambda \rho) = \frac{R}{\lambda^2} \left\{ I_1(\lambda R) L_0(\lambda R) - L_1(\lambda R) I_0(\lambda R) \right\} \Big|_{\rho}^{R2}$$

При этом переход к эффективной плотности тока j в цилиндрической обмотке от линейной плотности тока J бесконечнотонкого соленоида произведен на основании выражения:

$$dJ = jdR . \quad (15)$$

Модель на основе обычных функций Бесселя. По аналогии с полученными выше результатами для описания магнитного поля могут быть использованы цилиндрические гармоники, содержащие обычные функции Бесселя. Для этого следует воспользоваться представлением для обратного расстояния (5) при подстановке в (2) и (3), а также учесть непрерывность функции скалярного потенциала магнитного поля кругового тока, для которого справедливо выражение:

$$U = \text{sign}(z - z') \frac{IR}{2} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R) J_0(\lambda \rho) e^{-\lambda |z - z'|} d\lambda - \text{sign}(z - z') \frac{I}{2}. \quad (16)$$

Тогда для скалярного потенциала магнитного поля бесконечно-тонкого соленоида после интегрирования (16) с учетом (9) получим выражения:

$$U_{\text{внутри}} = JR \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda} J_1(\lambda R) J_0(\lambda \rho) e^{-\lambda \frac{H}{2}} \sinh(\lambda z) d\lambda - Jz, \quad |z| < H/2, \quad (17)$$

$$U_{\text{вне}} = \text{sign}(z) JR \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda} J_1(\lambda R) J_0(\lambda \rho) e^{-\lambda |z|} \sinh(\lambda \frac{H}{2}) d\lambda - Jz, \quad |z| > H/2. \quad (18)$$

На основании (17), (18) с использованием (15) для скалярного потенциала токовой цилиндрической обмотки можно получить представления:

$$U_{\text{внутри}} = j \int_0^{\infty} W(\lambda R) J_0(\lambda \rho) e^{-\lambda \frac{H}{2}} \sinh(\lambda z) d\lambda - jz(R2 - R1), \quad |z| < H/2$$

$$W(\lambda R) = \frac{1}{\lambda} \int_{R1}^{R2} R J_1(\lambda R) dR = \frac{\pi R}{2\lambda^2} \left\{ K_1(\lambda R) H_0(\lambda \rho) + H_1(\lambda R) K_0(\lambda \rho) \right\} \Big|_{R1}^{R2}, \quad (19)$$

$$U_{\text{вне}} = \text{sign}(z) j \int_0^{\infty} W(\lambda R) J_0(\lambda \rho) e^{-\lambda |z|} \sinh(\lambda \frac{H}{2}) d\lambda - jz(R2 - R1), \quad |z| > H/2$$

$$W(\lambda R) = \frac{1}{\lambda} \int_{R1}^{R2} R J_1(\lambda R) dR = \frac{\pi R}{2\lambda^2} \left\{ K_1(\lambda R) H_0(\lambda \rho) + H_1(\lambda R) K_0(\lambda \rho) \right\} \Big|_{R1}^{R2}, \quad (20)$$

где $H_n(\lambda \rho)$ – функции Струве.

Сравнение и обсуждение результатов. Полученные выражения для скалярного потенциала представленного на основе обычных функций Бесселя полностью эквивалентны соответствующим выражениям на основе модифицированных функций Бесселя, что подтверждается прямым расчетом потенциала. В частности для представления магнитного поля токовой цилиндрической обмотки с одинаковым успехом могут быть использованы как (12)-(14), так и (19)-(20) в зависимости от используемого типа функций Бесселя в модели намагниченности сердечника электромагнита.

Кроме того, для проверки может быть использовано аналитическое решение для напряженности магнитного поля, создаваемого на

аксиальной оси токовой цилиндрической обмотки [7]:

$$H_z(z) = \frac{j}{2} \left[\left(\frac{H}{2} - z \right) \ln \left[\frac{R2 + \sqrt{R2^2 + \left(\frac{H}{2} - z \right)^2}}{R1 + \sqrt{R1^2 + \left(\frac{H}{2} - z \right)^2}} \right] + \left(\frac{H}{2} + z \right) \ln \left[\frac{R2 + \sqrt{R2^2 + \left(\frac{H}{2} + z \right)^2}}{R1 + \sqrt{R1^2 + \left(\frac{H}{2} + z \right)^2}} \right] \right]. \quad (21)$$

Результаты расчета магнитного поля по (21), а также на основе (6) и полученных выражений для скалярного потенциала (12) или (19) совпадают с хорошей точностью (погрешность менее 0,1 %) даже для небольших (около 200) значений верхнего предела интегралов в (12) или (19).

Анализ результатов полученных для модели магнитного поля бесконечно тонкого соленоида совместно с результатами работ [8, 9] для однородно намагниченного вдоль аксиальной оси цилиндра показывает полную эквивалентность применения цилиндрических гармоник как на основе модифицированных, так и на основе обычных функций Бесселя. В обоих случаях разница между потенциалом магнитного поля внутри однородно намагниченного цилиндра и скалярным потенциалом внутри бесконечно тонкого соленоида равна потенциалу равномерного поля (второе слагаемое в (17)). Главное отличие состоит в том, что потенциал однородно намагниченного цилиндра описывается одним слагаемым при использовании цилиндрических гармоник на основе обычных функций Бесселя, а потенциал бесконечно тонкого соленоида описывается одним слагаемым при использовании цилиндрических гармоник на основе модифицированных функций Бесселя.

Выводы. Полученные представления скалярного потенциала магнитного поля на основе цилиндрических гармоник для токовой обмотки электромагнита могут быть использованы для построения аналитической модели намагниченности сердечника электромагнита цилиндрической формы и проведения оптимизации его конструкции по главному критерию – величине создаваемого магнитного момента.

Список литературы: 1. *Король Е.Г., Луников В.С., Рудас Ю.Д.* Оптимизация электромагнита компенсатора с ферромагнитным сердечником // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – 2011. – № 12. – С. 50-59. 2. *Коваленко А.П.* Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с. 3. *Smythe W.* Static and Dynamic Electricity. – ISBN: 0891169172, Publisher: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 623 p. 4. *Грэй Э, Мэтьюс Г.Б.* Функции Бесселя и их приложения к физике и механике // М.: ИЛ, 1953. – 372 с. 5. *Стрэттон Дж. А.* Теория электромагнетизма. – М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 539 с. 6. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 774 с. 7. *Иродов И.Е.* Основные законы электромагнетизма. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с. 8. *Гетьман А.В., Константинов А.В.* Цилиндрические гармоники магнитного поля однородно намагниченного цилиндра // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 51-53. 9. *Гетьман А.В., Константинов А.В.* Аналитическое представление магнитного поля соленоида с помощью цилиндрических гармоник // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 43-45.

Поступила в редколлегию 16.08.12

УДК 621.317.44

Цилиндрические гармоники скалярного потенциала магнитного поля токовой обмотки электромагнита / Гетьман А.В., Константинов А.В. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2012. – № 49 (955). – С. 66-72. Бібліогр.: 9 назв.

Розглянуто аналітичні моделі магнітного поля кругового струму, одношарового соленоїда і циліндричної обмотки, побудовані на основі циліндричних гармонік скалярного потенціалу. Показана еквівалентність застосування двох типів циліндричних гармонік для побудови моделі магнітного поля циліндричних віссесиметричних джерел.

Ключові слова: моделі магнітного поля, одношаровий соленоїд, циліндричні осесиметричні джерела.

Analytic models of the magnetic field of a circular current, a single-layer solenoid and a cylindrical coil, built on the base of cylindrical harmonics of a scalar potential are considered. The equivalence of utilization of two types of cylindrical harmonics to build models of the magnetic field of cylindrical axisymmetric sources is shown.

Keywords: magnetic field models, single-layer solenoid, cylindrical axisymmetric sources.

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

**СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ПОДЗЕМНЫХ ТОКОПРОВОДОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ЭКРАНАМИ,
СОСТОЯЩИМИ ИЗ U-ОБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Рассмотрены технические решения по повышению эффективности экранирования магнитного поля подземных трехфазных токопроводов и высоковольтных кабелей. Предложена конфигурация электромагнитного экрана, состоящего из двух U-образных проводящих элементов, и определено их оптимальное взаимное расположение. Показано, что при толщине стенок 1-2 мм эффективность экранирования магнитного поля трехфазного токопровода экраном, состоящим из двух U-образных элементов, на 15-20 % выше эффективности экранирования экранами известных конфигураций эквивалентного объема.

Ключевые слова: экранирование, высоковольтные кабели, электромагнитный экран.

Введение. В настоящее время для обеспечения электроэнергией жителей городов широко применяются подземные кабельные линии электропередачи (КЛ). Глубина прокладки токопроводов КЛ составляет 1-1,5 м, сила тока в них – 500-1000 А. Поэтому магнитное поле (МП) промышленной частоты, создаваемое подземными токопроводами и высоковольтными кабелями, оказывается достаточным, чтобы представлять потенциальную опасность для здоровья людей. Всемирная Организация Здравоохранения рекомендует предприятиям максимально снижать уровень МП [1]. В некоторых случаях удается уменьшить величину магнитной индукции поля систем токопроводов за счет применения таких конструктивно-технологических методов как расщепление фаз [2] или транспонирование [3]. Если же применение этих методов затруднительно или оно не приводит к снижению магнитной индукции до нормируемого уровня, то прибегают к электромагнитному экранированию.

Анализ известных конструкций экранов. В литературе рассмотрены следующие типы электромагнитных экранов (рис. 1): плоские (*a*), замкнутые (*b*), U-образные (*c*) и L-образные (*d*) [4-9]. В работах [4, 5] показано, что U-образные электромагнитные экраны обеспечивают большую эффективность экранирования МП трехфазных токопроводов по сравнению с другими типами экранов эквивалентного объема.

© Резинкина М.М., Гринченко В.С., 2012

Помимо экранов, представленных на рис. 1, в некоторых работах рассматривались V-образные, W-образные конфигурации [10] и замкнутые экраны с несплошными стенками [9]. Однако широкого распространения экраны таких конфигураций не получили, т.к. при своей конструктивной сложности их экранирующие свойства не превосходят экранирующих свойств U-образных экранов.

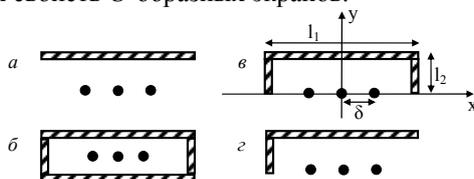


Рис. 1. Типы электромагнитных экранов: плоские (а), замкнутые (б), U-образные (в) и L-образные (г).

Некоторые авторы отдают предпочтение плоским экранам, объясняя это простотой их производства, монтажа и дальнейшего обслуживания токопроводов [8]. Но для повышения эффективности экранирования МП токопроводов при сохранении металлоемкости экранов необходимо применять их более совершенные конструкции, в частности, имеющие U-образные конфигурации.

Целью работы является исследование эффективности экранирования МП трехфазного токопровода системой двух U-образных проводящих элементов в зависимости от их толщины и взаимного расположения.

Определение оптимального расположения U-образных экранирующих элементов. Исходя из литературных данных [3-10], выберем характерные параметры подземного трехфазного токопровода: пусть межфазное расстояние $\delta=20$ см, амплитуда тока в фазах токопровода равна 500 А. Будем полагать, что кабельная линия находится под землей на характерной глубине 1 м.

Для снижения МП трехфазного токопровода предлагается использовать электромагнитный экран, состоящий из двух алюминиевых U-образных элементов. Такой элемент имеет три геометрических параметра: толщина стенок d , ширина верхней стенки l_1 и высота боковых стенок l_2 (рис. 1, в). Увеличение ширины экрана l_1 , и вместе с этим отношения l_1/δ , повышает эффективность экранирования МП трехфазного токопровода. Однако ширина экрана l_1 ограничена размерами кабельного канала и обычно не превышает четырехкратного расстояния между фазами трехфазного токопровода [4-8]. Увеличение высоты боковых стенок l_2 также повышает эффективность экранирования МП токопроводов [4]. Как правило, высота боковых стенок экрана, выбирается равной расстоянию от токопроводов до верхней стенки экрана, которое в свою очередь равно δ [4, 5]. В этом случае нижний край эк-

рана достигает плоскости расположения токопроводов, что облегчает доступ токопроводам КЛ.

Будем рассматривать электромагнитный экран, состоящий из двух алюминиевых U-образных элементов шириной $l_1=4\cdot\delta$ и высотой $l_2=\delta$. Положение нижнего элемента экрана определено: его нижний край достигает плоскости расположения трехфазного токопровода. Путем численного моделирования определим оптимальное положение верхнего U-образного элемента. Для исследования электромагнитных процессов в системе, содержащей трехфазный токопровод и два U-образных экранирующих элемента, воспользуемся математической моделью, описанной в [11]. Толщину элементов положим равной $d=1$ мм и будем варьировать расстояние b между ними от 20 см до 60 см. На рис. 2, а-в представлены рассчитанные распределения линий равных действующих значений магнитной индукции ($B=5-500$ мкТл) поля трехфазного токопровода при наличии двух U-образных экранирующих элементов, когда расстояние между ними составляет $b=\delta=20$ см (рис. 2, а), $b=2\cdot\delta=40$ см (рис. 2, б) и $b=3\cdot\delta=60$ см (рис. 2, в).

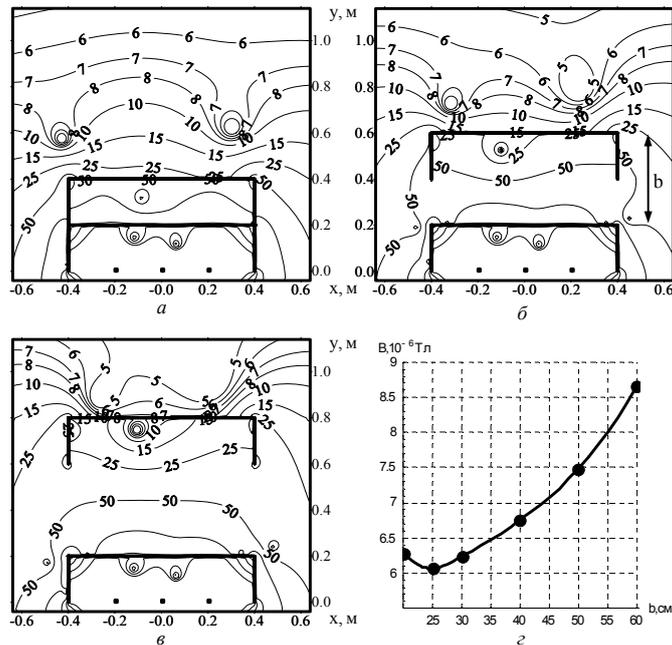


Рис. 2. Распределения линий равных действующих значений магнитной индукции (а-в) и показана зависимость максимального действующего значения магнитной индукции (г)

На рис. 2,з показана зависимость максимального действующего значения магнитной индукции поля трехфазного токопровода на расстоянии 1 м (равной характерной глубине его прокладки) при наличии электромагнитного экрана, состоящего из двух *U*-образных элементов, от расстояния *b* между этими элементами. Как видно из представленного графика, действующее значение магнитной индукции достигает минимума, когда расстояние между *U*-образными элементами равно 25 см. Тем не менее, максимальное значение магнитной индукции на уровне 1 м над трехфазным токопроводом, когда расстояние между элементами равно $b=\delta=20$ см, превышает максимальное значение магнитной индукции при $b=25$ см всего на 3%. Если расстояние *b* между элементами положить равным δ , то $b=l_2=\delta$. Такой экран конструктивно проще, т.к. его верхний *U*-образный элемент будет опираться на нижний. Таким образом, оптимальным является расположение *U*-образных экранирующих элементов, представленное на рис. 2,а.

Исследование зависимости эффективности экранирования МП трехфазного токопровода *U*-образными экранами от толщины их стенок. Варьируя толщину стенок экранирующих элементов, исследуем эффективность экранирования МП трехфазного токопровода экранами, состоящими из одного (рис. 1,б) и двух *U*-образных алюминиевых элементов (рис. 2,а). В таблице для каждого из этих экранов приведены значения толщины стенок (*d*), площади поперечного сечения экрана (*S*), которая прямо пропорциональна его объему, величины, до которой снижена магнитная индукция поля токопровода (*B*) на высоте 1 м над экранируемым трехфазным токопроводом, и эффективности экранирования *SF* в точке максимальной магнитной индукции. Эффективность экранирования *SF* определяется как отношение действующего значения магнитной индукции в точке наблюдения в отсутствии экрана к действующему значению магнитной индукции при его наличии.

Таблица – Параметры каждого из представленных экранов

<i>U</i> -образный экран			<i>S</i> , см ²	экран, состоящий из двух <i>U</i> -образных проводящих элементов		
<i>d</i> , мм	<i>B</i> , мкТл	<i>SF</i>		<i>d</i> , мм	<i>B</i> , мкТл	<i>SF</i>
1,5	9,5	3,5	18	0,75	9,1	3,6
2	7,5	4,4	24	1	6,4	5,1
3	5,5	6,0	36	1,5	4,8	5,7
4	4,6	7,1	48	2	4,2	6,5
6	3,8	8,0	72	3	3,7	7,5

Из приведенной таблицы следует, что экран, состоящий из двух *U*-образных элементов, обладает большей эффективностью экраниро-

вания по сравнению с U -образным экраном эквивалентного объема.

Качественно этот эффект можно объяснить следующим образом. При снижении уровня МП различают экранирование защищаемой области и экранирование источника поля [4]. Первый подход применим, если требуется снизить уровень поля в локальной области, для снижения МП токопроводов используют второй подход. Применение электромагнитного экрана, состоящего из двух U -образных элементов, позволяет объединить эти два подхода: экран находится возле трехфазного токопровода, но его верхний U -образный элемент расположен ближе к части экранируемого пространства, где уровень МП источника изначально выше, тем самым, обеспечивая в этой области большее его снижение.

Выводы. В результате проведенных исследований предложена конструкция электромагнитного экрана, состоящего из двух расположенных друг над другом U -образных проводящих элементов, ширина которых в 4 раза превосходит межфазное расстояние, высота боковых стенок элементов равна межфазному расстоянию, а край нижнего элемента достигает плоскости расположения токопроводов. Показано, что применение таких экранов толщиной 1-2 мм позволяет на 15-20 % увеличить эффективность экранирования МП трехфазного токопровода по сравнению с однослойным U -образными экранами эквивалентного объема.

Список литературы: 1. World Health Organization International EMF Project "Electromagnetic Fields and Public Health: Extremely low frequency fields and cancer." – October, 2001. – Fact Sheet № 263. 2. Розов В.Ю. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и полупроводниковых преобразователей / Розов В.Ю., Ерисов А.В., Луников В.С. – К. Институт электродинамики, 1996. – 47 с. – (Препринт / НАН Украины, Ин-т электродинамики; № 791). 3. Mimos E.I. Optimum phase configurations for the minimization of the magnetic fields of underground cables / E.I. Mimos, D.K. Tsanakas, A.E. Tzinevrakis // Electrical engineering. – 2010. – № 91. – Pp. 327-335. 4. 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. 5. 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 March, 2007. – Sevilla, 2007. – Paper 326. 6. 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. 7. Salinas E. Some 2D-3D aspects of shielding of longitudinal sources of extremely low frequency magnetic fields / E. Salinas, M. Rezinkina, J. Atalaya // Environmentalist. – 2009. – Vol. 29, № 2. – P. 141-146. 8. Bascom C. Magnetic field management considerations for underground cable duct bank / C. Bascom, J. Cooper, W. Banker, R. Piteo, A. Regan, S. Boggs // The transactions of the IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition, 9-14 October

2005. – New Orleans, Louisiana, 2005 – Paper 05TD0399. **9.** Cucu M. Magnetic field in encapsulated bus-bars / M. Cucu, M.O. Popescu // Universitatea Politehnica Bucuresti Buletin Stintific. – 2011. – Series C, Vol. 73, Iss. 1. – P. 129-142. **10.** Cardelli E. Nonferromagnetic open shields at industrial frequency rate / E. Cardelli, A. Faba, A. Pirani // IEEE transactions on magnetics. – 2010. – V. 46, № 3. – P. 889-898. **11.** Резинкина М.М. Расчетный выбор параметров электромагнитных экранов сложной пространственной конфигурации / М.М. Резинкина, А.А. Щерба, В.С. Гринченко, К.О. Резинкина // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 1. – С. 10-16.

Поступила в редколлегию 07.10.2012

УДК 621.3.013

Снижение уровня магнитного поля подземных токопроводов электромагнитными экранами, состоящими из U-образных элементов / Резинкина М.М., Гринченко В.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 73-78. Бібліогр.: 11 назв.

Розглянуті технічні засоби з підвищення ефективності екранування магнітного поля підземних трифазних токопроводів та високовольтних кабелів. Запропонована конфігурація електромагнітного екрану, що складається із двох U-подібних провідних елементів, і визначено їх оптимальне взаємне розташування. Показано, що при товщині стінок 1-2 мм ефективність екранування магнітного поля трифазного токопроводу екраном, що складається із двох U-подібних елементів, на 15-20 % вище за ефективність екранування екранами відомих конфігурацій еквівалентного об'єму.

Ключові слова: екранування, високовольтні кабелі, електромагнітний екран.

Technical solutions to improve the efficiency of the screening of the magnetic field of three-phase current conductors and underground high-voltage cables are considered. A configuration of the electromagnetic screen, consisting of two U-shaped conductive elements is proposed, and their optimal relative position is determined. It is shown that with a wall thickness of 1-2 mm, the efficiency of the screening of the magnetic field of a three-phase current conductor by a screen, held on two U-shaped elements is 15-20% higher than efficiency of the screening by screens of known configurations of equivalent volume.

Keywords: screening, high-voltage cables, electromagnetic screen.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНДУКТОРОВ – ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ МИОМ

В рамках статьи проведены экспериментальные исследования индуктивности индукторов-инструментов, применяемых в магнитно-импульсной обработке металлов, разработанных в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ. Сформулировано условие тонкостенности обрабатываемого объекта при магнитно-импульсном воздействии на него.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, магнитно-импульсная установка, индуктор-инструмент, индуктивность.

Постановка проблемы. Для эффективной практической реализации магнитно-импульсных методов необходим индуктор-инструмент (индукторная система), который трансформирует энергию, накопленную в емкостных накопителях магнитно-импульсной установки (МИУ), в энергию импульсного магнитного поля. Эффективность (КПД) данного процесса определяется соотношением электротехнических параметров МИУ и инструмента-индуктора. Наиболее важным, из которых является индуктивность. Зная индуктивность индукторов-инструментов, и согласуя их с индуктивностью источника мощности-МИУ, можно добиться эффективного выполнения необходимой производственной операции методами МИОМ [1-3].

Цель, задачи исследования. Цель – экспериментальное определение основного параметра – индуктивности индукторов-инструментов для магнитно-импульсных методов обработки металлов, разработанных в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ.

Задачи исследования:

1. Измерение индуктивности комплекса для имитации процессов в инструментах магнитно-импульсной рихтовки вмятин в элементах автомобильных кузовов.

2. Измерение индуктивности индукционной индукторной системы (ИИС) с массивным дополнительным экраном и цилиндрическим индуктором (рис. 1, а).

© Гнатов А.В., Чаплыгин Е.А., 2012

3. Измерение индуктивности индукционно-индукторной системы с тонкостенным дополнительным экраном и цилиндрическим индуктором (рис. 1, б).

4. Измерение индуктивности индукционно-индукторной системы с тонкостенным дополнительным экраном и индуктором прямоугольной формы (рис. 1, в).

5. Измерение индуктивности цилиндрического индуктора, рабочая область которого в сечении имеет форму усеченного массивного конуса (рис. 1, г).

6. Измерение индуктивности индукционно-индукторной системы с массивным дополнительным экраном и двухвитковым цилиндрическим индуктором (рис. 1, д).

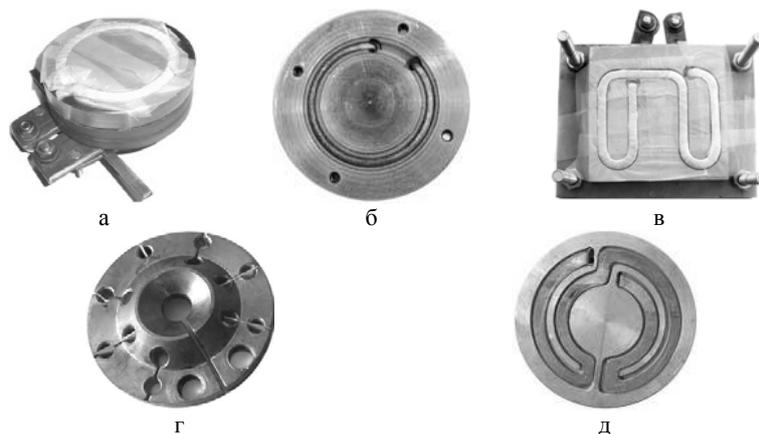


Рис. 1. Индукционные индукторные системы: а – с массивным дополнительным экраном и цилиндрическим индуктором; б – с тонкостенным дополнительным экраном и цилиндрическим индуктором; в – с тонкостенным дополнительным экраном и индуктором прямоугольной формы; г – рабочая область в сечении имеет форму усеченного массивного конуса; д – с массивным дополнительным экраном и двухвитковым цилиндрическим индуктором.

Условия эксперимента. В перечисленных задачах упоминаются массивный и тонкостенный дополнительный экран. Для большей наглядности поставленных задач следует раскрыть физическую значимость данных определений.

Металлическую заготовку следует считать тонкостенной, если для нее выполняется условие [3, 4]:

$$\omega \cdot \tau \ll 1, \quad (1)$$

где ω – угловая частота спектра действующего магнитного поля; τ –

характерное время диффузии поля в проводящий слой с электропроводимостью γ и толщиной d , $\tau = \mu_r \mu_0 \gamma d^2$.

Для выяснения физического значения условия тонкостенности преобразуем его так, чтобы выделить отношение толщины проводящего слоя d к эффективной глубине проникновения поля δ .

После несложных преобразований в выражении (1) получаем эквивалентное неравенство:

$$\left(\frac{d}{\delta}\right) \ll \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}}$, μ – абсолютная магнитная проницаемость среды.

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, μ_r – магнитная проницаемость металла.

Соотношение (2) количественно показывает, что металлическая заготовка является тонкостенной с физической точки зрения, если ее толщина много меньше эффективной глубины проникновения поля в среду с идентичными параметрами.

Экспериментальные исследования проводились на комплексе для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов, разработанного в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ, рис. 2

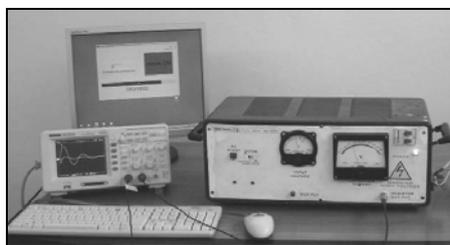


Рис. 2. Комплекс для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов.

Комплекс работал в серийном режиме генерации разрядных импульсов, при следующих параметрах:

- напряжение питающей сети $\sim U_c = 220$ В;
- напряжение заряда емкостных накопителей $U_3 = 650$ В;
- ёмкость конденсаторов комплекса $C = 33$ мкФ;
- частота следования разрядных импульсов $f_{\text{имп.}} = 20$ Гц.

Осциллограммы сигналов измерялись в разрядной цепи комплекса с помощью цифрового осциллографа PV6501 включенный в разрядную цепь через шунт с сопротивлением $R_{\text{ш}} = 12,5 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Полученные осциллограммы сигналов в соответствии с поставленными задачами представлены на рис. 3.

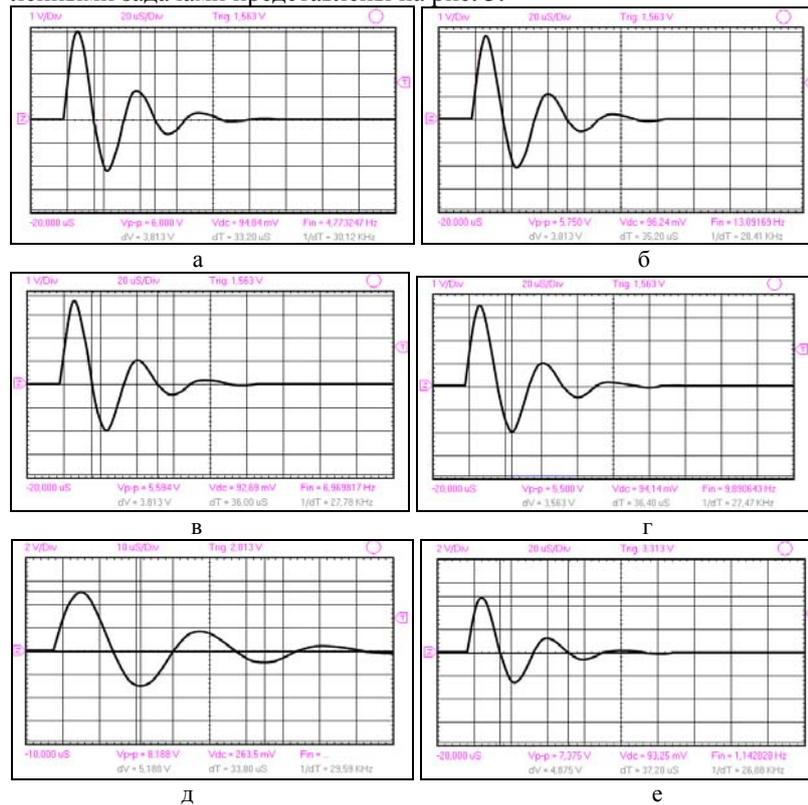


Рис. 3. Осциллограммы разрядных сигналов: разрядный импульс комплекса на закороченый вывод (а); ИИС с массивным дополнительным экраном и цилиндрическим индуктором (б); ИИС с тонкостенным дополнительным экраном и цилиндрическим индуктором (в); ИИС с тонкостенным дополнительным экраном и индуктором прямоугольной формы (г); цилиндрический массивный индуктор, рабочая область которого в сечении имеет форму усеченного конуса (д); ИИС с массивным дополнительным экраном и двухвитковым цилиндрическим индуктором (е).

Индуктивность L вычислялась с помощью осциллограмм по хорошо известной формуле:

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} \quad (3)$$

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

Результаты обработки осциллограмм сведены в таблицу.

Таблица – Результаты обработки осциллограмм

Исследуемое устройство	Частота сигнала, f , кГц	Индуктивность L , нГн
Комплекс для имитации процессов	30,12	847
Индукционная индукторная система с массивным дополнительным экраном и цилиндрическим индуктором (рис. 1, а)	28,41	105
Индукционная индукторная система с тонкостенным дополнительным экраном и цилиндрическим индуктором (рис. 1, б)	27,78	149
Индукционная индукторная система с тонкостенным дополнительным экраном и индуктором прямоугольной формы (рис. 1, в)	27,47	171
Цилиндрический массивный индуктор, рабочая область которого в сечении имеет форму усеченного конуса (рис. 1, г)	29,59	30
ИИС с массивным дополнительным экраном и двухвитковым цилиндрическим индуктором (рис. 1, д)	26,88	237

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования индукторов-инструментов с последующей их обработкой позволяет сделать следующие выводы.

- Наибольшей индуктивностью обладают индукторные системы с двухвитковыми индукторами: ИИС с массивным дополнительным экраном и двухвитковым цилиндрическим индуктором ИИС $L=237$ нГн; ИИС с двухвитковым индуктором прямоугольной формы $L=171$ нГн.

- Наименьшей индуктивностью обладает цилиндрический массивный индуктор, рабочая область которого в сечении имеет форму усеченного конуса $L=30$ нГн.

Список литературы: 1. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / [авт. сот. И.В. Бельий, С.М. Фертик, Л.Т. Хищенко]. – Харьков: Вища школа, 1977. – 190с. 2. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хищенко. – Т.1; под ред. Ю.В. Батыгина. – [2-е изд.]. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с. 3. 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. 4. *Ландау Л.Д.* Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, – М: "Наука", 1982. – 620 с.



Гнатов Андрей Викторович, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском военном университете 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.

Поступила в редколлегию 27.09.2012

УДК 621.318

Экспериментальные исследования индукторов-инструментов для МИОМ / Гнатов А.В., Чаплыгин Е.А. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2012. – № 49 (955). – С. 79-84. Бібліогр.: 4 назв.

У рамках статті проведені експериментальні дослідження індуктивності індукторів-інструментів, що застосовуються у магнітно-імпульсній обробці металів, розроблених у лабораторії електромагнітних технологій ХНАДУ. Сформульовано умову тонкостінності оброблюваного об'єкта при магнітно-імпульсному впливі на нього.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, магнітно-імпульсна установка, індуктор-інструмент, індуктивність.

Experimental investigations of inductor-tools inductance, which are used in magnetic-pulse metal working, developed in KhNAHU laboratory of electromagnetic technology, have been carried out in the paper. A condition of a thin-walled work piece at magnetic-pulse impact on it has been formulated.

Key words: magnetic-pulse metal working, magnetic-pulse plant, inductor – work tool, inductance.

К.В. КОРЫТЧЕНКО, канд. техн. наук, ст.н.сотр., начальник научной лаборатории "Современные методы вооружений" факультета военной подготовки НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПРЯМОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В работе проведен анализ условий прямого инициирования детонации в области минимума критических энергий. Расчетные исследования проведены по модели одномерного инициирования в цилиндрической симметрии, построенной на основе системы уравнений одномерной газодинамики и химической кинетики применительно к стехиометрической водородно-кислородной смеси атмосферного давления. Обоснование требования к источнику инициирования с точки зрения практической досягаемости критических параметров инициирования.

Ключевые слова: прямое инициирование детонации, водородно-кислородная смесь.

Область исследования процессов инициирования детонации является актуальной как с точки зрения обеспечения взрывобезопасности, так и для решения прикладных задач по созданию энергоэффективных детонационных систем: пульсирующих детонационных двигателей, мощных детонационных лазеров, систем гуманитарного разминирования объемным взрывом и т.п. [1-3].

Васильевым А.А. предложена следующая классификация способов инициирования воспламенения горючей смеси: слабое, переход горения в детонацию, сильное [4]. В результате слабого воспламенения у источника инициирования формируется ламинарное или турбулентное пламя с характерными дозвуковыми скоростями его распространения по смеси. В случае сильного инициирования в непосредственной близости от инициатора возникает детонационная волна, которая распространяется по горючей смеси со сверхзвуковой скоростью. Сильное инициирование также принято называть прямым инициированием детонации. Инициирование перехода горения в детонацию обеспечивается первоначально зажиганием смеси от слабого инициатора и последующим ускорением пламени за счет автотурбулизации или взаимодействия с препятствиями и переходом к детонации. Такой переход возникает на существенном удалении от источника зажигания. В данной работе рассматривается задача прямого инициирования детонации.

© Корытченко К.В., 2012

В настоящее время установлено ряд параметров, влияющих на прямое инициирование детонации: критическая энергия, критическое время, критический объем [5]. Под критической энергией подразумевается минимальное количество энергии, которую необходимо затратить для инициирования детонации в заданных условиях. Иницирование детонации определяется временем ввода энергии в заданный объем. Поэтому критическая энергия представляет собой функцию зависимости от времени и объема. Влияние начальных термодинамических условий, состава детонирующей среды и параметров инициатора на критические параметры в данной работе не рассматриваются.

Целью данной работы является анализ условий прямого инициирования детонации в области минимума критических энергий с точки зрения практической достигаемости критических параметров инициирования. Расчетные исследования проведены по модели одномерного инициирования в цилиндрической симметрии, построенной на основе системы уравнений одномерной газодинамики и химической кинетики применительно к стехиометрической водородно-кислородной смеси атмосферного давления.

Анализ литературы. Взаимосвязь критических параметров прямого инициирования детонации.

Книстаутас Р. (Knystautas R.) и Ли Дж. (Lee J.), на основании обработки экспериментальных результатов по критическим параметрам прямого инициирования детонации искровых разрядом, установили зависимость критической энергии $Q_{кр}$ от времени ее ввода в ацетиленокислородную смесь [5]. Согласно полученной зависимости (рис. 1), для каждой детонирующей смеси имеется параметр критического времени, в случае превышения которого критическая энергия начинает возрастать. В представленных результатах критическое время равняется около $\tau_{кр} \approx 0,1$ мкс. Также было установлено, что производная критических параметров (энергии и времени) в виде критической мощности $P_{кр}$ ввода энергии в детонирующую смесь имеет минимум в области критического времени, что видно по результатам (рис. 1, 2). Данный параметр имеет важное значение при анализе практической реализуемости.

Левиним В.А., Марковым В.В. и др. получена взаимосвязь между критическими параметрами инициирования на основе численного моделирования инициирования детонации в одномерной постановке газодинамической задачи в цилиндрической симметрии с учетом кинетики химических реакций применительно к стехиометрической водородно-кислородной смеси [6]. Ввод энергии в задаче осуществлялся по фиксированному радиусу.

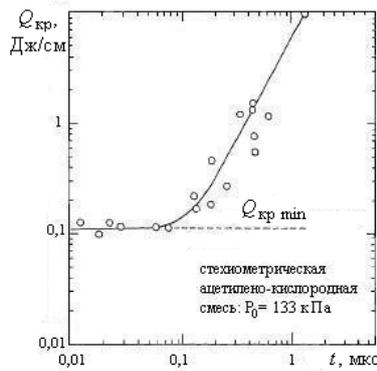


Рис. 1. Зависимость критической энергии $Q_{кр}$ инициирования от времени t её ввода по данным работы [5]

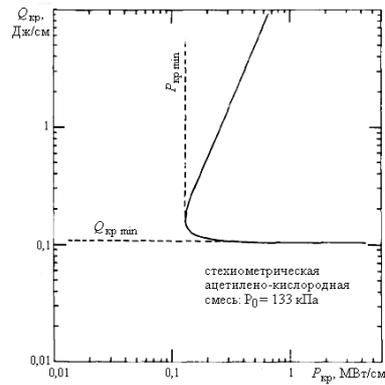


Рис. 2. Зависимость критической энергии $Q_{кр}$ от критической мощности $P_{кр}$ по данным работы [5]

Изменение удельной мгновенной мощности W (мощности, подводимой к единице объема) представлялось следующей зависимостью:

$$W(t) = \begin{cases} \frac{Q_0}{2\tau r_{ввод}^2} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (1)$$

где Q_0 – величина энергии электрического разряда, отнесенная к единице длины и выделяемая в канале радиусом $r_{ввод}$ начиная с момента времени $t = 0$ в течение времени τ .

Решение задачи в такой постановке позволило подтвердить наличие критического времени ввода энергии в канал. В представленных результатах расчета критической энергии для стехиометрической водородно-кислородной смеси при начальных значениях температуры $T_0 = 298$ К и давления $P_0 \approx 50$ кПа показано (рис. 3), что если длительность разряда не превышает некоторой величины, которая в приведенном примере составляет $\tau_{кр} = 0,002$ мс, то критическая энергия составляет $Q_{кр} = Q_0 = 320$ Дж/м.

Установлено [6], что в случае превышения критического времени $\tau_{кр}$ критическая энергия $E_{кр}$ инициирования детонации начинает зависеть от времени ввода энергии в канал по зависимости:

$$Q_{кр} \sim (\tau_{кр})^\alpha, \quad (2)$$

где $\alpha \approx 2$ [7].

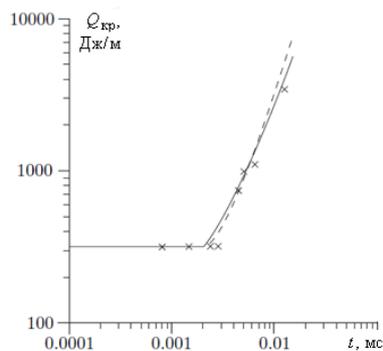


Рис. 3. Зависимость критической энергии $Q_{кр}$ от времени ввода энергии при инициировании детонации в водородно-кислородной смеси при $P_0 \approx 50$ кПа и $t_{ввод} = 0,001$ м: расчет (сплошная линия); аналитическая зависимость (штриховая линия); экспериментальные данные (x) [6]

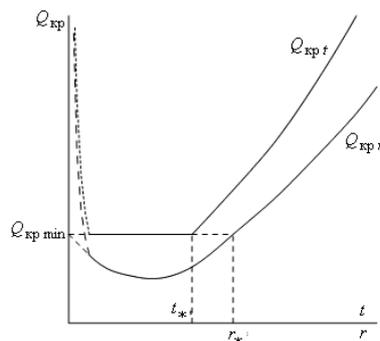


Рис. 4. Характерная зависимость критической энергии от времени ее ввода в объем и размера данного объема по Васильеву А.А. [4]

Следует отметить, что авторы указывают о влиянии объема, в который осуществляется ввод энергии, на критическую энергию. При этом отмечается, что существует оптимальные размеры данного объема, при котором критическая энергия достигает минимального значения [6]. Оценку данного влияния авторы не приводят.

Результаты исследования влияния объема, в который вводится энергия, на критическую энергию представлены Васильевым А.А. (рис. 4). Согласно полученных им результатов, за счет изменения объема возможна минимизация критической энергии. То есть, существует критический объем, при котором критическая энергия достигает минимального значения. При этом, время ввода критической энергии не должно превышать критического времени. На основании выполнения условий по не превышению критического объема и критического времени, автор дает рекомендацию, согласно которой идеальный инициатор детонации должен соответствовать критериям "мгновенности" и "точности".

Представленные Васильевым А.А. результаты о влиянии объема на критическую энергию являются не полными, так как рассматривают процесс прямого инициирования детонации только под воздействием ударной волны, формируемой в результате быстрого выделения энергии в заданном объеме.

Известным альтернативным методом прямого инициирования детонации является инициирование объемным воспламенением, теоретически обоснованным Я.Б. Зельдовичем, Либровичем В.Б. и др. Данными авторами обоснован механизм возникновения детонации в двигателях внутреннего сгорания, основанный на взрывообразном объемном протекании химических реакций. По этому механизму инициирование детонации обеспечивается ударной волной, формируемой в результате "одновременного" воспламенения горючей смеси в большом объеме. В работе [8] при постановке задачи в начальный момент времени в реакционно-способном газе задается распределение температуры (рис. 5) в полупространстве $X > 0$ в виде линейной функции:

$$T(0,X) = T_0 - \chi X. \quad (3)$$

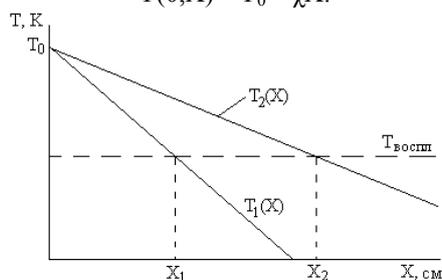


Рис. 5. Начальное распределение температуры при моделировании инициирования детонации по механизму Зельдовича Я.Б. и др. [8]

Согласно представленным расчетно-теоретическим исследованиям, условия для инициирования детонации по данному механизму возникают, если в неравномерно разогретой горючей смеси появляется градиент температуры χ , превышающий некое критическое значение. Так как температура T_0 в указанной работе имела фиксированное значение $T_0 = 2000$ К, то соответственно, изменение градиента χ приводило к изменению размеров области нагретого газа, в котором в начальный момент времени созданы условия для протекания процесса сгорания. Это дает основание предположить, что критическим условием возникновения детонации является не градиент температуры, а критический размер области объемного воспламенения, то есть критический объем.

Вышеизложенное дает основание считать, что критическая энергия представляет собой функцию зависимости от времени и объема.

Математическая модель прямого инициирования детонации при фиксированных параметрах ввода энергии в моделируемый канал. Проведем количественную оценку зависимости критической

энергии от времени её ввода и размера области ввода данной энергии применительно к стехиометрической водородно-кислородной смеси, находящейся в стандартных начальных условиях ($P_0 = 10^5$ Па; $T_0 = 293,15$ К). В качестве источника инициирования детонации предусматривается применение искрового разряда. Так как газодинамическое расширение искрового канала имеет цилиндрическую симметрию, то задача инициирования рассматривалась в цилиндрической постановке.

В одномерной постановке в диапазоне $0 < r < l$ решалась система газодинамических уравнений (неразрывности, импульса и энергии) для многокомпонентной газовой смеси в виде:

$$\frac{\partial \vec{a}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \vec{b})}{\partial r} = \frac{1}{r} \vec{f}, \quad (4)$$

где вектор-столбцы равны:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v \\ \rho \varepsilon + \rho v^2 / 2 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} \rho v \\ P + \rho v^2 \\ u(\rho \varepsilon + \rho v^2 / 2 + P) \end{pmatrix}, \quad \vec{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ P \\ r \cdot W \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где ρ – плотность газа; v – скорость; P – давление; ε – внутренняя энергии газа; r – координата по радиусу, W – удельная мощность, вводимая от источника энергии.

Давление в смеси определялось по сумме парциальных давлений компонентов смеси в виде:

$$P = R_* T \sum_i y_i, \quad (6)$$

где R_* – универсальная газовая постоянная; T – температура газа; y_i – концентрация i -й компоненты.

Энергия единицы объема смеси рассчитывалась по выражению:

$$\rho \varepsilon = \sum_i y_i U_i^0, \quad (7)$$

где U_i^0 – внутренняя энергия 1 моля компоненты смеси, рассчитываемая по выражению:

$$U_i^0 = H_i^0 - RT, \quad (8)$$

где H_i^0 – энтальпия образования 1 моля компоненты.

Плотность смеси рассчитывалась по выражению:

$$\rho = \sum_i y_i \cdot \mu_i, \quad (9)$$

где μ_i – молярная масса i -й компоненты.

Процесс инициирования детонации рассматривался примени-

тельно к стехиометрической водородно-кислородной смеси, находящейся в стандартных начальных условиях. Химическая кинетика сгорания водорода моделировалась по упрощенной кинетической схеме, заимствованной из работы [9], включала в себя 8 компонент (H, O, OH, H₂O₂, O₂, H₂, HO₂, H₂O) и описывалась системой из 17 элементарных обратимых химических реакций.

В начальных условиях принято отсутствие газодинамических возмущений во всей расчетной области. На оси разрядного канала принято отсутствие градиентов термодинамических параметров газа. Размер расчетной области задавался таким образом, чтобы возмущение не достигало границы.

Ввод энергии осуществлялся по фиксированному радиусу в течение задаваемого времени при постоянной удельной мощности $W = \text{const}$. Такая постановка задачи не отражает ввод энергии в искровом разряде, изменяющийся как во времени, так и пространстве, но позволяет выработать требования к инициатору.

Расчет проводился с использованием модифицированной схемы Годунова С.К. второго порядка точности. Стойкость расчетной схемы достигнута за счет выполнения условия Куранта. Решение уравнений химической кинетики сводилось к решению жесткой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Правильность математической модели подтверждена совпадением параметров детонационной волны, получаемых при расчете, с параметрами детонационной волны Чепмена-Жуге.

Результаты моделирования прямого иницирования детонации при фиксированных параметрах ввода энергии в моделируемый канал. Проведем анализ иницирования в условиях, когда в процессе ввода энергии падение плотности газа в канале, по которому осуществлялся ввод, осуществляется незначительно. В этом случае источник иницирования соответствует критерию "мгновенности". То есть, изменение термодинамического состояния газа в канале практически соответствует нагреванию в постоянном объеме. Расчеты показали, что при радиусе ввода энергии, равном $r_{\text{ввод1}} = 0,0001$ м, расширение канала происходит незначительно за время, не превышающее $t \leq 10^{-8}$ с. Поэтому данное сравнение проведено при времени ввода энергии, равном $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с. Путем расчета динамики расширения канала при изменении количества энергии в каждом расчете, вводимой за время $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с, по параметрам распределения термодинамического состояния газа в расчетной области определялось минимальное количество энергии, при которой возникала детонация. Удельная мощность источника энергии, вводимой в канал, имела фиксированное значение

на период ввода энергии. Заключение о наличии инициирования детонации принималось в случае, если термодинамическое состояние газа во фронте волны после прекращения ввода энергии приближалось к параметрам, соответствующим расчетному термодинамическому состоянию детонационной волны Чепмена-Жуге, и поддерживалось с отклонением не более чем на 10 % в течение последующих нескольких микросекунд (рис. 6). Так, согласно [10], параметры на фронте детонационной волны, возникающей в стехиометрической водородно-кислородной смеси при начальной плотности $\rho_0 = 0,491 \text{ кг/м}^3$ имеют значения: $P_\phi = 1,879 \text{ МПа}$; $T_\phi = 3682 \text{ К}$. При этом, скорость детонационной волны составляет $D = 2873 \text{ м/с}$. В представленных ниже результатах начальная плотность равнялась $\rho_0 = 0,536 \text{ кг/м}^3$, что приводит к более повышенным значениям термодинамического состояния газа на фронте волны.

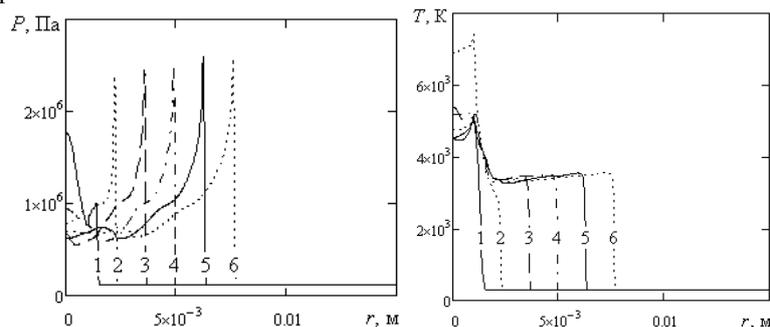


Рис. 6. Распределение давления (слева) и температуры (справа) вдоль радиуса r расчетной области на разные моменты времени при инициировании детонации в стехиометрической водородно-кислородной смеси при $r_{\text{ввод}} = 0,001 \text{ м}$ и $t_{\text{ввод}} = 10^{-6} \text{ с}$ и $W = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ Вт/м}^3$: $t_1 = 0,5 \text{ мкс}$, $t_2 = 1 \text{ мкс}$, $t_3 = 1,5 \text{ мкс}$, $t_4 = 2 \text{ мкс}$, $t_5 = 2,5 \text{ мкс}$, $t_6 = 3 \text{ мкс}$

Расчеты приведены для фиксированных радиусов $r_{\text{ввод}}$ ввода энергии, значения которых равнялись $0,0001 \text{ м}$; $0,0002 \text{ м}$; $0,0005 \text{ м}$; $0,001 \text{ м}$; $0,002 \text{ м}$; $0,003 \text{ м}$; $0,005 \text{ м}$. Получено, что с ростом радиуса $r_{\text{ввод}}$ при $t_{\text{ввод}} = 10^{-8} \text{ с}$ происходит возрастание критической энергии инициирования детонации (рис. 7). В области радиуса $r_{\text{ввод}} = 0,003 \text{ м}$ наблюдается снижение энергии инициирования.

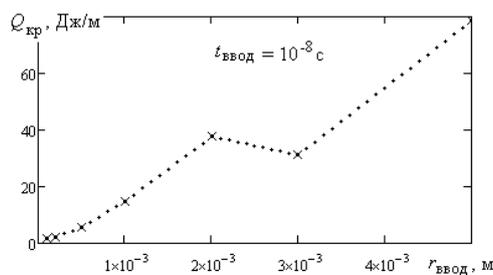


Рис. 7. Зависимость критической энергии $Q_{кр}$ инициирования детонации в стехиометрической водородно-кислородной смеси от радиуса ввода энергии $r_{ввод}$ при $t_{ввод} = 10^{-8}$ с

Полагается, что снижение энергии вблизи $r_{ввод} = 0,003$ м связано с изменением механизма инициирования детонации. Так, при меньших радиусах ввода энергии инициирование детонации обеспечивается ударной волной, движущейся по горючей смеси, параметры которой соответствуют начальным условиям (рис. 8). При этом, в расчетном варианте инициирование происходит за период времени, не превышающий 1,5 мкс.

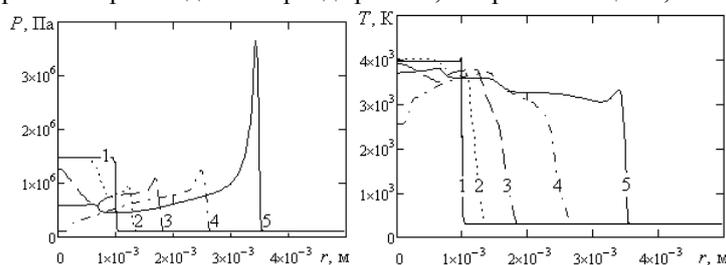


Рис. 8. Распределение давления (слева) и температуры (справа) вдоль радиуса r расчетной области на разные моменты времени при $r_{ввод} = 0,001$ м и $t_{ввод} = 10^{-8}$ с и $W = 4,5 \cdot 10^{14}$ Вт/м³: $t_1 = 10^{-8}$ с, $t_2 = 0,2$ мкс, $t_3 = 0,5$ мкс, $t_4 = 1$ мкс, $t_5 = 1,5$ мкс

При возрастании радиуса ввода энергии с превышением некой величины, соответствующей в рассматриваемой задаче $r_{ввод} \approx 0,003$ м, инициирование детонации происходит с задержкой. В расчетном варианте (рис. 9) при $r_{ввод} = 0,005$ м первоначально на протяжении около 2 мкс происходят предпламенные реакции (кривые 1-5), в которых происходит наработка химически активных радикалов (период индукции) в условиях пренебрежимо малого изменения термодинамического состояния смеси. На последующем интервале 2,5...3,5 мкс (кривые 6, 7) наступает стадия цепных реакций вблизи центра канала с нарастанием

температуры, давления и формированием волны сжатия. При этом, данная волна распространяется с ускорением по уже "подготовленной" смеси с обострением фронта волны (кривые 8, 9) и дальнейшем переходом в детонационную волну (кривая 9).

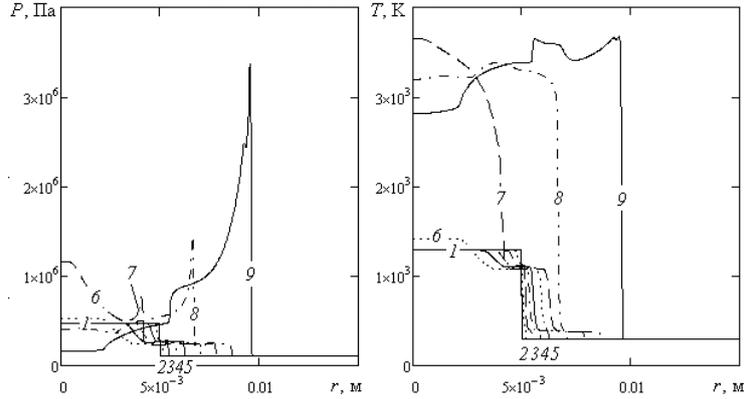


Рис. 9. Распределение давления (слева) и температуры (справа) вдоль радиуса r расчетной области на разные моменты времени при $r_{\text{ввод}} = 0,005$ м и $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с и $W = 10^{14}$ Вт/м³: $t_1 = 10^{-8}$ с, $t_2 = 0,2$ мкс, $t_3 = 0,5$ мкс, $t_4 = 1$ мкс, $t_5 = 1,5$ мкс, $t_6 = 2,5$ мкс, $t_7 = 3,5$ мкс, $t_8 = 4,5$ мкс, $t_9 = 5,5$ мкс

С возрастанием радиуса $r_{\text{ввод}}$ при фиксированном времени $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с происходит уменьшение минимальной (критической) удельной мощности $W_{\text{кр}}$ ввода энергии, при которой происходит инициирование детонации (рис. 10). Но после превышения радиуса, при котором обеспечивается инициирование объемным воспламенением, критическая мощность принимает фиксированное значение. В расчетных условиях задачи при $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с критическая мощность составила $W_{\text{кр}} = 10^{14}$ Вт/м³.

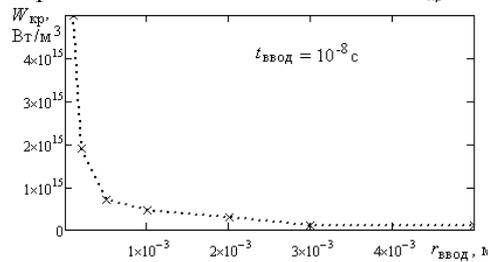


Рис. 10. Зависимость критической мощности $W_{\text{кр}}$ для инициирования детонации в стехиометрической водородно-кислородной смеси в стандартных начальных условиях от радиуса ввода энергии $r_{\text{ввод}}$ при $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с

Выход на фиксированное значение критической удельной мощности с ростом радиуса ввода энергии при фиксированном времени ввода связано с необходимостью нагревания горючей смеси до температуры, при которой обеспечивается протекание предпламенных химических реакций. В расчетных вариантах данная температура составила около $T \approx 1350$ К.

С возрастанием радиуса $r_{\text{ввод}}$ при фиксированном времени ввода $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с также уменьшаются требования к верхним порогам давления и температуры, которые необходимо достичь за время $t_{\text{ввод}}$ для обеспечения инициирования детонации. В расчетных вариантах, при радиусе $r_{\text{ввод}} = 0,0001$ м и $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с требуется достичь давление $P_{\text{макс1}} \approx 20$ МПа и температуру $T_{\text{нагр1}} \approx 30000$ К (рис. 11). Для сравнения, уже при радиусе $r_{\text{ввод}} = 0,001$ м и $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с требуемые параметры снижаются до $P_{\text{макс2}} \approx 1,5$ МПа и $T_{\text{нагр2}} \approx 4000$ К (рис. 8).

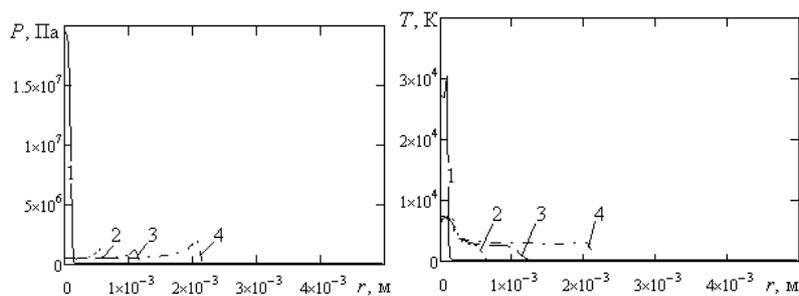


Рис. 11. Распределение давления (слева) и температуры (справа) вдоль радиуса r расчетной области на разные моменты времени при $r_{\text{ввод}} = 0,0001$ м и $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с и $W = 5 \cdot 10^{15}$ Вт/м³: $t_1 = 10^{-8}$ с, $t_2 = 0,2$ мкс, $t_3 = 0,5$ мкс, $t_4 = 1$ мкс

Следует учитывать, что в модели не учитываются затраты энергии на ионизацию. Поэтому фактические затраты энергии искрового разряда будут выше расчетных, особенно при температуре $T > 10000$ К.

Расчетная зависимость пороговых значений температуры, создаваемой за время $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с, при которой обеспечивается инициирование детонации в стехиометрической водородно-кислородной смеси в указанных начальных условиях в зависимости от радиуса ввода энергии имеет вид (рис. 12).

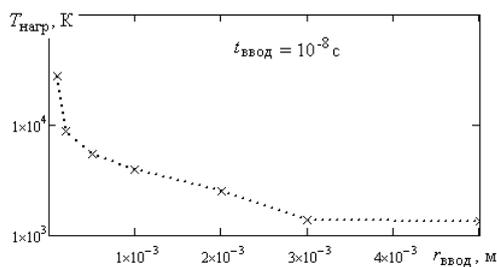


Рис. 12. Зависимость пороговых значений температуры, создаваемой за время $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с, при которой обеспечивается иницирование детонации, от радиуса ввода энергии

Следует отметить, что температура самовоспламенения смеси водорода с кислородом равняется около $T_{\text{св}} \approx 750$ К. Необходимость в нагревании смеси до температуры $T \approx 1350$ К для достижения иницирования за счет объемного воспламенения может быть связана с отличием в периоде индукции. Так, по данным работы Р.И. Солоухина [11], резкое сокращение периода индукции в данной смеси наблюдается в условиях превышения температуры более $T > 1000$ К (рис. 13).

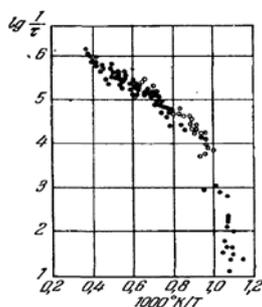


Рис. 13. Зависимость периода индукции в водородно-кислородной смеси от температуры по данным Р.И. Солоухина [11]

Расчеты зависимости критической энергии от времени ввода при разных радиусах $r_{\text{ввод}}$ ввода энергии 0,0001 м; 0,001 м подтвердили ранее полученные другими авторами результаты о наличии критического времени. В расчетных вариантах данное время при $r_{\text{ввод}} < 0,001$ м составило около $\tau_{\text{кр}} = 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-7}$ с (рис. 14, 15).

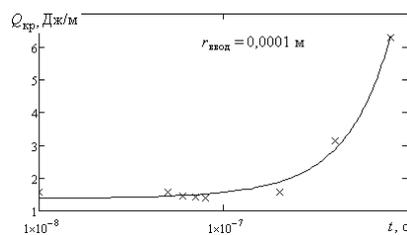


Рис. 14. Зависимость критической энергии от времени ввода при радиусе ввода энергии $r_{\text{ввод}} = 0,0001$ м

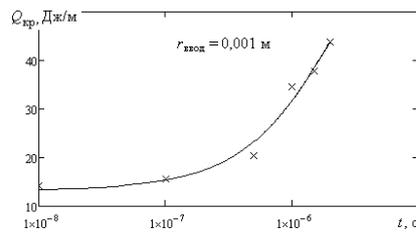


Рис. 15. Зависимость критической энергии от времени ввода при радиусе ввода энергии $r_{\text{ввод}} = 0,001$ м

Но с увеличением радиуса ввода энергии при возрастании времени ввода энергии критическая энергия увеличивается более медленно.

Выводы. Полученные результаты могут быть полезны для оценки взрывобезопасности, а также для решения задачи энергоэффективного периодического инициирования детонации в пульсирующих детонационных двигателях, мощных детонационных лазерах, системах гуманитарного разминирования объемным взрывом и т.п.

На основании анализа условий прямого инициирования детонации в области минимума критических энергий получено, что в случае увеличения радиуса, по которому осуществляется ввод энергии, снижается удельная мощность источника энергии, уменьшаются пороговые значения температуры, которую необходимо достичь за счет ввода энергии, увеличивается время, в течение которого требуется ввести критическую энергию. Поэтому, считается целесообразным создавать источники инициирования, в которых обеспечивается объемный ввод энергии.

Список литературы: 1. Баженова Т.В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме / Т.В. Баженова, В.В. Голуб // Физика горения и взрыва. – 2003. – 39, (4). – С. 3-21. 2. Митрофанов В.В. Тяговые характеристики идеального пульсирующего детонационного двигателя / В.В. Митрофанов, С.А. Ждан // Физика горения и взрыва. – 2004. – т. 40. № 4. – С. 8-14. 3. Тарасов А.И. Использование пульсирующих детонационных технологий для повышения тяговой эффективности двигателей / А.И. Тарасов, В.А. Щупаков // Общие вопросы двигателестроения. – 2010. – С. – 69-72. 4. Васильев А.А. Энергетические аспекты инициирования бытовых газов / А.А. Васильев // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 45, №1. – С. 96-101. 5. Knystautas R. On the effective energy for direct initiation of gaseous detonations / R. Knystautas, J.H. Lee // Combustion and flame. – 1976. – № 27. – P. 221-228. 6. Левин В.А. Нелинейные волновые процессы при инициировании распространении газовой детонации / В.А. Левин, В.В. Марков, Т.А. Журавская, С.Ф. Осинкин // Труды математиче-

ского института им. В.А. Стеклова. – 2005. – Т. 251. – С. 200-214. 7. Lee J.H. Initiation of gaseous detonation / J.H. Lee // Ann. Rev. Phys. Chem. – 1977. – V. 28. – P. 75-104. 8. Зельдович Я.Б. О возникновении детонации в неравномерно нагретом газе / Я.Б. Зельдович, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе, Г.И. Сивагинский // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1970. – №2. – С.76-84. 9. Murray S. Explosion Physics - Fundamentals and Current Developments // Professor I.I. Glass 6th Memorial Lecture. – 2001. 10. Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем / В.В. Митрофанов – Новосибир.: изд. ИГиЛ СО РАН. – 2003. – 200 с. 11. Солоухин Р.И. Детонационные волны в газах / Р.И. Солоухин // Успехи физических наук. – 1963. – Т. LXXX. – вып. 4. – С. 525-551.

Поступила в редколлегию 09.10.2012

УДК 544.45, 537.075.8

Анализ условий прямого инициирования детонации в водородно-кислородной смеси атмосферного давления / Корытченко К.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 85-98. Бібліогр.: 11 назв.

В роботі проведено аналіз умов прямого ініціювання детонації в області мінімуму критичних енергій. Розрахункові дослідження проведені за моделлю одновимірного ініціювання в циліндричній симетрії, побудованої на основі системи рівнянь одномірної газодинаміки та хімічної кінетики стосовно до стехіометричної воднево-кисневої суміші атмосферного тиску. Обґрунтування вимог до джерела ініціювання з точки зору практичної досяжності критичних параметрів ініціювання.

Ключові слова: пряме ініціювання детонації, воднево-киснева суміш.

In the paper analysis of conditions of direct initiation of detonation in the region of the minimum of critical energy is carried out. Calculations are carried out by a model of one-dimensional initiation in cylindrical symmetry, built on the base of a system of equations of one-dimensional gas dynamics and chemical kinetics with respect to the stoichiometric hydrogen-oxygen mixture at atmospheric pressure. Substantiation of requirements for initiation source from a point of view of practical reach of the critical parameters of initiation.

Keywords: direct initiation of detonation, hydrogen-oxygen mixture.

В.В. ЗІНЗУРА, асистент, КНТУ, Кіровоград

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ РПН
СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Розроблено структурну схему системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора, застосування якої дозволяє одночасно знижувати рівні відхилення та несиметрії напруги по зворотній послідовності в електричній мережі з ізольованою нейтраллю, а також досліджено якість роботи запропонованої системи шляхом математичного моделювання в середовищі Simulink.

Ключові слова: система автоматичного управління, силовий трансформатор, математичне моделювання.

Вступ. На сучасному етапі розвитку систем електропостачання досить актуальним є питання якості електроенергії (ПЯЕ). Як відомо, завищені показники якості електричної енергії, негативно впливають на роботу електричних споживачів, викликають додаткові втрати в елементах електричних мереж та ін. Існуючі методи зменшення рівнів відхилення та несиметрії напруги не завжди є ефективними з точки зору техніко-економічних показників.

Постановка задачі. Задача розробки нових методів та засобів зниження рівня цих ПЯЕ які, з одного боку, були б досить ефективними, а з іншого – не вимагали б значних капіталовкладень є досить актуальною. Одним із шляхів вирішення даної задачі є удосконалення систем автоматичного управління (САУ) пристроєм РПН силового трансформатора.

Аналіз публікацій. В роботі [1] запропоновано математичну модель управління безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора, в основу якої покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації. В роботі [2] проведено розробку методу розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричній мережі з ізольованою нейтраллю. Проте, для визначення ефективності даного методу зниження рівнів відхилення та несиметрії напруги в електричних мережах необхідно на основі запропонованої в [1] математичної моделі управління провести розробку структурної схеми САУ пристроєм РПН, а також дослідити якість роботи розробленої САУ.

© Зінзура В.В., 2012

Мета статті. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора, що забезпечує одночасне зниження рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруги по зворотній послідовності в мережі з ізольованою нейтраллю.

Основна частина. В роботі [1] сформульовано математичну модель управління безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора, що працює в мережі з ізольованою нейтраллю:

$$\begin{cases} Q_1(\mathbf{K}) = |\Delta U_1(\mathbf{K})| = |U_1(\mathbf{K}) - U_{ном}| \rightarrow \min; \\ Q_2(\mathbf{K}) = U_2(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega; \end{cases} \quad (1)$$

де $\mathbf{Q}(\mathbf{K}) = (Q_1(\mathbf{K}), Q_2(\mathbf{K}), Q_3(\mathbf{K}))$ – вектор критеріїв управління; $\mathbf{K} = (k_A, k_B, k_C)$ – вектор коефіцієнтів трансформації трансформатора у фазах А, В, С (вектор управління); $U_1(\mathbf{K})$ – напруга прямої послідовності; $\Delta U_1(\mathbf{K})$ – різниця значень модуля напруги прямої послідовності та номінальної напруги (пропорційний відхиленню напруги); $U_{ном}$ – номінальна напруга мережі ($U_{ном} = 1$); $U_2(\mathbf{K})$ – напруга зворотної послідовності; $\Omega = \{\mathbf{K} \in \mathbb{R}^3 | k_{i \min} \leq k_i \leq k_{i \max}, i = A, B, C\}$ – область допустимих значень \mathbf{K} , яка визначається глибиною регулювання коефіцієнта трансформації (допустимий простір управління); $k_{i \min}, k_{i \max}, i = A, B, C$ – відповідно мінімальне та максимальне значення коефіцієнту трансформації для кожної з фаз.

Значення напруг та значення коефіцієнтів трансформації в рівнянні (1) підставляються у відносних одиницях, віднесених до номінальних значень.

Як показано в роботі [2], найбільш доцільним способом розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1) є розв'язок її шляхом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв, який проводиться в два етапи:

1 етап. Оптимізацією окремих критеріїв визначаються координати утопічної точки $Q_{ym} = (\Delta U_{Iym}, U_{2ym})$ в просторі критеріїв $\{Q\} \subset \mathbb{R}^2$.

2 етап. Шляхом розв'язку задачі скалярної оптимізації відстані ρ від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації \mathbf{K}^* в просторі управління $\Omega \subset \mathbb{R}^3$.

Задача знаходження аналітичних виразів для визначення координат утопічної точки Q_{ym} детально описана в роботі [1], тому наведемо

лише кінцеві вирази для знаходження її розв'язку.

Вираз для знаходження ΔU_{Iym} :

$$\Delta U_{Iym} = \begin{cases} 0, \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) \neq \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}); \\ |\Delta U_1(\mathbf{K}_{\min})|, \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) = \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}) = -1; \\ |\Delta U_1(\mathbf{K}_{\max})|, \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) = \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}) = 1; \end{cases} \quad (2)$$

де $\mathbf{K}_{\min} = (k_{A\min}, k_{B\min}, k_{C\min})$, $\mathbf{K}_{\max} = (k_{A\max}, k_{B\max}, k_{C\max})$ – вектори мінімальних і максимальних коефіцієнтів трансформації трансформатора; ΔU_1 – відхилення напруги прямої послідовності.

Вираз для знаходження U_{2ym} :

$$U_{2ym} = \begin{cases} U_2 [\Phi_{2A}(k_{B\min}, k_{C\max}), k_{B\min}, k_{C\max}], (k_{B2} < k_{B\min}) \wedge \\ \wedge \{[(k_{A2} < k_{A\min}) \wedge (\xi_2 \leq 1)] \vee (k_{A\min} \leq k_{A2} \leq k_{A\max})\}; \\ U_2 [\Phi_{2A}(k_{B\max}, k_{C\min}), k_{B\max}, k_{C\min}], (k_{B1} > k_{B\max}) \wedge \\ \wedge \{[(k_{A1} > k_{A\max}) \wedge (\xi_2 > 1)] \vee (k_{A\min} \leq k_{A1} \leq k_{A\max})\}; \\ U_2 [k_{A\min}, \Phi_{2B}(k_{A\min}, k_{C\max}), k_{C\max}], (k_{A2} < k_{A\min}) \wedge \\ \wedge \{[(k_{B2} < k_{B\min}) \wedge (\xi_2 > 1)] \vee (k_{B\min} \leq k_{B2} \leq k_{B\max})\}; \\ U_2 [k_{A\max}, \Phi_{2B}(k_{A\max}, k_{C\min}), k_{C\min}], (k_{A1} > k_{A\max}) \wedge \\ \wedge \{[(k_{B1} > k_{B\max}) \wedge (\xi_2 \leq 1)] \vee (k_{B\min} \leq k_{B1} \leq k_{B\max})\}; \\ U_2 [k_{A\min}, k_{B\max}, \Phi_{2C}(k_{A\min}, k_{B\max})], \left(\xi_2 > \frac{k_{B\max}}{k_{A\min}}\right) \wedge \\ \wedge \neg [(k_{B2} < k_{B\max}) \vee (k_{A1} > k_{A\min})]; \\ U_2 [k_{A\max}, k_{B\min}, \Phi_{2C}(k_{A\max}, k_{B\min})], \left(\xi_2 < \frac{k_{B\min}}{k_{A\max}}\right) \wedge \\ \wedge \neg [(k_{A2} < k_{A\max}) \vee (k_{B1} > k_{B\min})]; \\ 0, \left(\frac{k_{B\min}}{k_{A\max}} \leq \xi_2 \leq \frac{k_{B\max}}{k_{A\min}}\right) \wedge \neg \{[(k_{A2} < k_{A\min}) \wedge (k_{B2} < k_{B\max})] \vee \\ \vee [(k_{A1} > k_{A\min}) \wedge (k_{B1} > k_{B\max})] \vee [(k_{A2} < k_{A\max}) \wedge \\ \wedge (k_{B2} < k_{B\min})] \vee [(k_{A1} > k_{A\max}) \wedge (k_{B1} > k_{B\min})]\} \end{cases} \quad (3)$$

де $U_{Aa}, U_{Ap}, U_{Ba}, U_{Bp}, U_{Ca}, U_{Cp}$ – активні та реактивні складові векторів напруг $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ відповідно; $\Phi_{2A}(k_B, k_C), \Phi_{2B}(k_A, k_C), \Phi_{2C}(k_A, k_B)$ – розв’язки рівнянь $\partial U_2(\mathbf{K}) / \partial k_A = 0, \partial U_2(\mathbf{K}) / \partial k_B = 0, \partial U_2(\mathbf{K}) / \partial k_C = 0$ відповідно; ξ_2 – постійний коефіцієнт; $k_{A1}, k_{B1}, k_{A2}, k_{B2}$ – значення коефіцієнтів трансформації, отримані в результаті підстановки в рівняння системи (4) значень $k_{C \min}, k_{C \max}$ відповідно;

$$\begin{cases} k_A = \frac{U_{Aa}U_{Ba} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ba} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Bp} + U_{Ap}U_{Bp}}{U_{Ba}U_{Ca} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Bp}U_{Ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ba}U_{Cp} + U_{Bp}U_{Cp}} k_C; \\ k_B = \frac{U_{Aa}U_{Ba} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ba} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Bp} + U_{Ap}U_{Bp}}{U_{Aa}U_{Ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ca} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Cp} + U_{Ap}U_{Cp}} k_C. \end{cases} \quad (4)$$

Метод знаходження кінцевого розв’язку задачі (1) описаний в роботі [2]:

$$\mathbf{K}^{opt} = \begin{cases} \mathbf{K}^{opt1}, (\Delta U_{Iym} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} \leq U_{2no}) \wedge \\ \wedge (\Delta U_I^{opt1} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_2^{opt1} \leq U_{2no}); \\ \mathbf{K}^{opt2}, (\Delta U_{Iym} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} > U_{2no}) \wedge (\Delta U_I^{opt2} \leq \Delta U_{Ino}); \\ \mathbf{K}^{opt3}, (\Delta U_{Iym} > \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} \leq U_{2no}) \wedge (U_2^{opt3} \leq U_{2no}); \\ \mathbf{K}^{evk}, [(\Delta U_{Iym} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} \leq U_{2no}) \wedge (\Delta U_I^{opt1} > \Delta U_{Ino}) \wedge \\ \wedge (U_2^{opt1} > U_{2no})] \vee [(\Delta U_{Iym} \leq \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} > U_{2no}) \wedge \\ \wedge (\Delta U_I^{opt2} > \Delta U_{Ino})] \vee [(\Delta U_{Iym} > \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} \leq U_{2no}) \wedge \\ \wedge (U_2^{opt3} > U_{2no})] \vee [(\Delta U_{Iym} > \Delta U_{Ino}) \wedge (U_{2ym} > U_{2no})]. \end{cases} \quad (5)$$

де \mathbf{K}^{opt} – розв’язок задачі (5); \mathbf{K}^{optj} – розв’язок задачі (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \left\{ \mu_1^{(j)} \left| \frac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{Iym}}{\Delta U_{Iнд}} \right|, \mu_2^{(j)} \left| \frac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2ym}}{U_{2нд}} \right| \right\} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{array} \right. \quad (6)$$

при $j=1$: $\mu_1^{(1)} = \alpha_1 / (\alpha_1 + \alpha_2)$, $\mu_2^{(1)} = \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)$; при $j=2$:
 $\mu_1^{(2)} = 0$, $\mu_2^{(2)} = 1$; при $j=3$: $\mu_1^{(3)} = 1$, $\mu_2^{(3)} = 0$;
 $\alpha_1 = \left| \Delta U_{Iнд} / (\Delta U_{Iнд} - \Delta U_{Iym}) \right|$, $\alpha_2 = \left| U_{2нд} / (U_{2нд} - U_{2ym}) \right|$;
 $Q^{opti}(\Delta U_I^{opti}, U_2^{opti})$ – точка в просторі критеріїв з координатами
 $\Delta U_1(\mathbf{K}^{opti})$ та $U_2(\mathbf{K}^{opti})$; \mathbf{K}^{evk} – розв'язок задачі (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\left(\frac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{Iym}}{\Delta U_{Iнд}} \right)^2 + \left(\frac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2ym}}{U_{2нд}} \right)^2} \rightarrow \min. \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{array} \right. \quad (7)$$

Задачі (6), (7) – це задачі скалярної оптимізації функції багатьох змінних, для їх вирішення необхідно скористатись одним із чисельних методів.

Структурна схема САУ, що реалізує математичну модель управління (1) представлена на рис. 1.

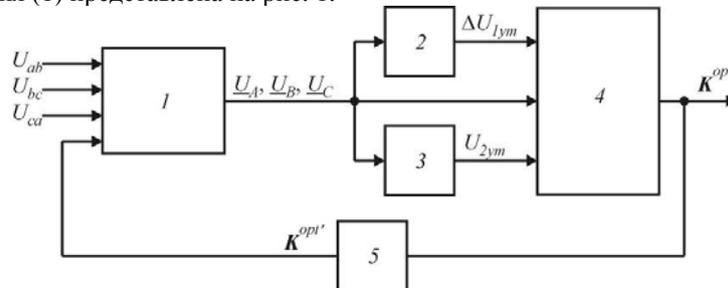


Рис. 1. Структурна схема САУ пристроєм РПН силового трансформатора

На рис. 1: 1 – блок розрахунку комплексів напруг $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ на стороні високої напруги (ВН) по відомим діючим значенням міжфазних напруг U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} на стороні низької напруги (НН) та значенню \mathbf{K}^{opt} на попередньому кроці розрахунку (для трансформатора із схемою з'єднання обмоток "зірка/трикутник"); 2 – блок визначення

ΔU_{Iym} згідно формул (2); 3 – блок визначення U_{2ym} згідно формул (3); 4 – блок визначення кінцевого розв'язку згідно формул (5); 5 – блок затримки сигналу на один крок розрахунку.

САУ, структурна схема якої зображена на рис. 1, працює наступним чином. Виміряні діючі значення U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} міжфазних напруг на стороні низької напруги силового трансформатора разом із значенням коефіцієнтів трансформації K^{opt} , прийнятих на попередньому кроці розрахунку надходить до блоку 1, в якому відбувається розрахунок комплексів напруг \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C на стороні ВН силового трансформатора. Далі значення \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C надходять до блоків 2 і 3, в яких відбувається розрахунок ΔU_{Iym} і U_{2ym} відповідно. Після чого дані з блоків 1, 2, 3 надходять до блоку 4, в якому визначається кінцевий розв'язок задачі (1) K^{opt} . Значення вектора K^{opt} з блоку 4 надходить до керуючого органу РПН, який виконує перемикання відпайок обмоток трансформатора, а також блоку затримки сигналу 5, з якого на наступному кроці розрахунку надходить до блоку 1. Розрахунок K^{opt} проводиться в дискретні моменти часу, проміжки між якими обмежуються лише часом перехідного процесу в мережі.

Для дослідження якості роботи запропонованої САУ було проведено математичне моделювання в середовищі Simulink. Узагальнена модель Simulink регулювання напруги приведена на рис. 2.

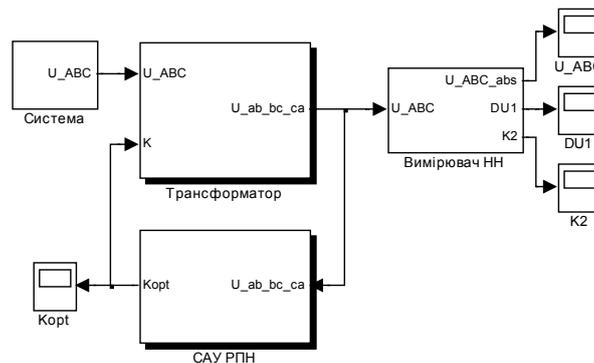


Рис. 2. Модель Simulink системи регулювання напруги

На рис. 2: "Трансформатор" – модель силового трансформатора

ТМН-400/35, оснащеного безконтактним пристроєм РПН з діапазоном регулювання напруги $\pm 6 \times 1,5 \%$; "Вимірювач НН" – модель вимірювача діючих значень напруг U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , відхилення напруги δU_1 та коефіцієнту несиметрії напруги по зворотній послідовності K_2 на стороні НН силового трансформатора; "Система" – модель електричної системи; в якості вихідних даних для моделювання були взяті реальні часові діаграми діючих значень міжфазних напруг, що були виміряні протягом доби на одній із підстанцій ПАТ "Кіровоградобленерго" з допомогою сертифікованого аналізатора мережі FLUKE 1744 Memobox; "САУ РПН" – модель САУ пристроєм РПН.

Модель блоку "САУ РПН" приведена на рис. 3, на якому: "Subsystem" – блок визначення векторів \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C по значенням U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , K^{opt} (відповідає блоку 1 на рис. 1); "DUut" – блок визначення ΔU_{Iym} (блок 2 на рис. 1); "U2ut" – блок визначення U_{2ym} (блок 3 на рис. 1); "Optimization" – блок визначення K^{opt} (блок 4 на рис. 1); "Transport Delay" – блок затримки сигналу на 1 крок розрахунку (блок 5 на рис. 1); "Kmin", "Kmax" – блоки, що задають мінімальне та максимальне значень коефіцієнтів трансформації.

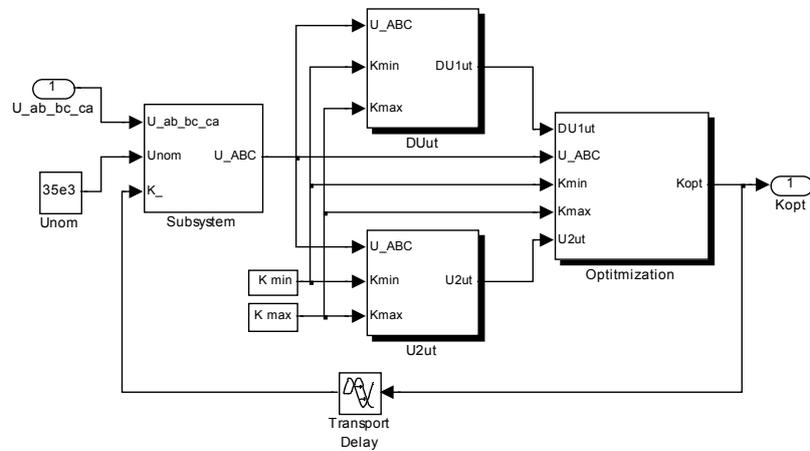


Рис. 3. Модель Simulink САУ РПН силового трансформатора

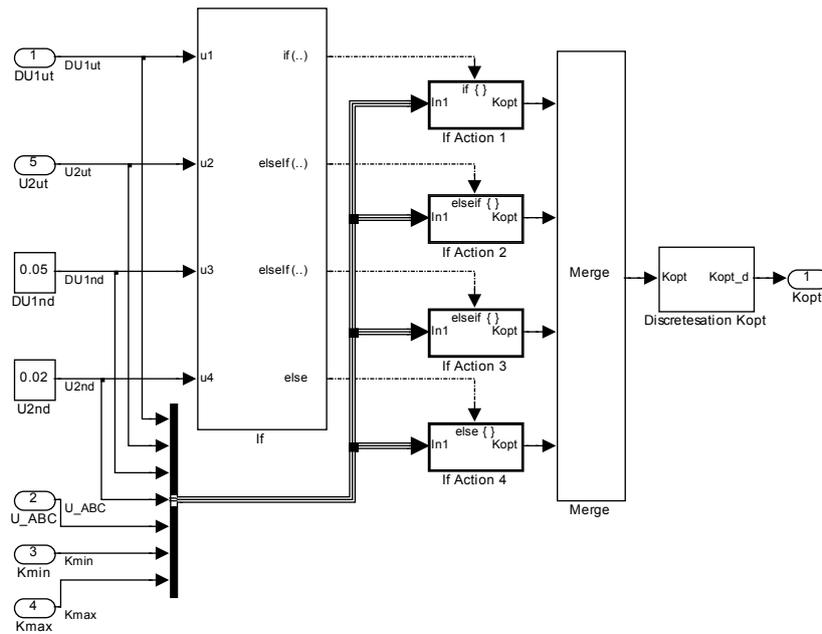


Рис. 4. Модель Simulink САУ пристроєм РПН силового трансформатора

Модель блоку "Optimztation" приведена на рис. 4, на якому: "DU1nd", "K2nd" – блоки, що задають нормально допустимі значення δU_1 та K_2 відповідно; "Discretisation Kopt" – блок дискретизації значень коефіцієнтів трансформації трансформатора; блоки "If", "If Action 1"... "If Action 4", "Merge" реалізують умовний оператор.

На рис. 5 наведено графіки зміни δU_1 та K_2 на стороні ВН силового трансформатора. Як можна бачити, значення відхилення напруги досить тривалий проміжок часу перевищують нормально допустимі межі $\delta U_{1нд} = \pm 5\%$; значення K_2 також практично весь період спостереження лежать за межами нормально допустимого значення $K_{2нд} = 2\%$.

На рис. 6 наведено графіки зміни δU_1 та K_2 при використанні класичної САУ пристроєм РПН силового трансформатора. З рис. 6 видно, що хоча значення δU_1 і не виходять за межі $\delta U_{1нд}$, значення K_2 залишилися на тому ж рівні, що і на стороні ВН.

На рис. 7 наведено графіки зміни δU_1 та K_2 при використанні за-

пропонованої САУ пристроєм РПН. Як видно з рис. 7, як значення δU_1 , так і значення K_2 не перевищують нормально допустимих меж.

Статистичні показники δU_1 та K_2 для описаних вище трьох варіантів моделювання, наведені в таблиці.

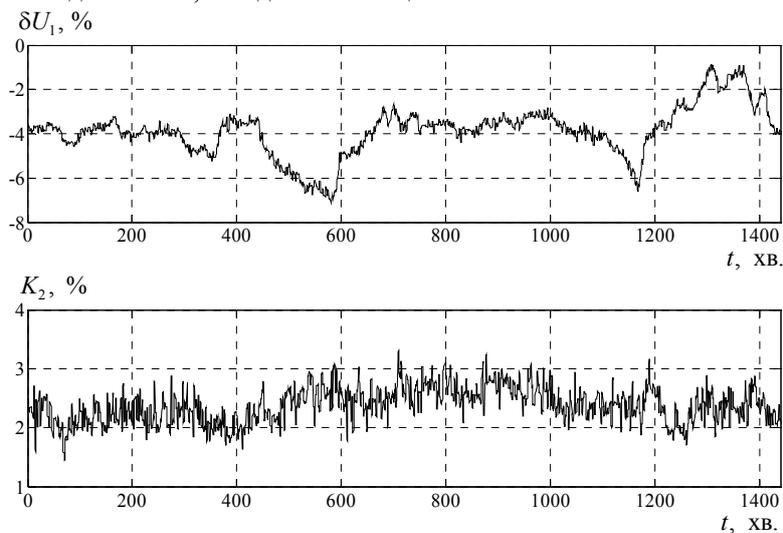


Рис. 5. Графіки зміни $\delta U_1, K_2$ без регулювання напруги

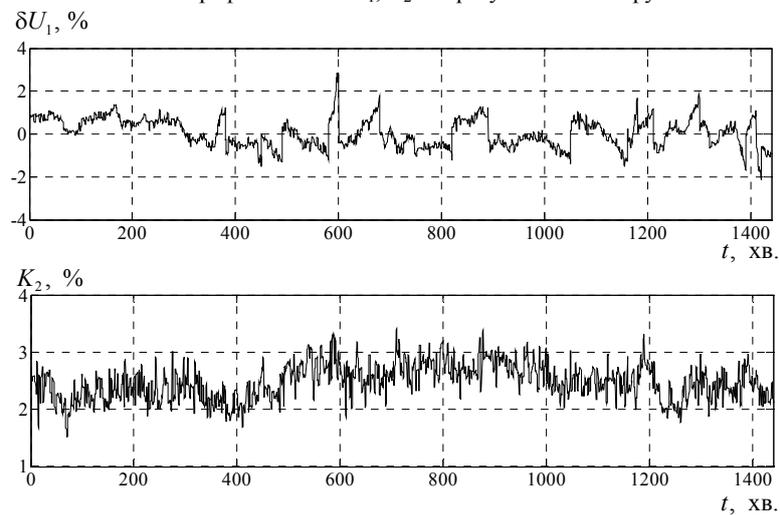


Рис. 6. Графіки зміни $\delta U_1, K_2$ при класичному регулюванні напруги

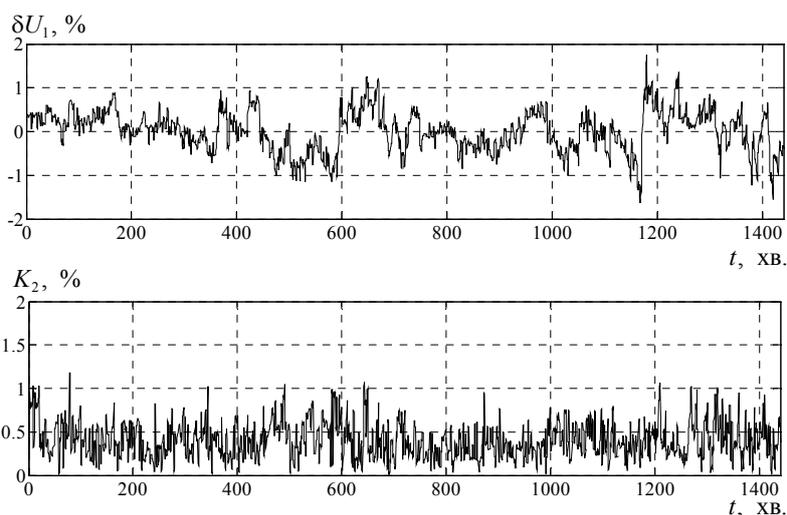


Рис. 7. Графіки зміни δU_1 , K_2 при оптимальному регулюванні напруги

Таблиця – Статистичні показники δU_1 та K_2 .

№ з/п	Показник якості електроенергії	Математичне очікування, M , %	Середньоквадратичне відхилення, σ^2 , %	Інтегральна ймовірність, P , %
Сторона ВН силового трансформатора				
1.	δU_1	-3,88	1,10	87,0
2.	K_2	2,38	0,30	11,2
Сторона НН силового трансформатора (класичне регулювання)				
3.	δU_1	0,04	0,67	100
4.	K_2	2,44	0,32	5,9
Сторона НН силового трансформатора (оптимальне регулювання)				
5.	δU_1	0,004	0,46	100
6.	K_2	0,40	0,21	100

Висновки. На основі математичної моделі управління пристроєм РПН силового трансформатора, в основу роботи якої покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації, розроблено структурну схему САУ, досліджено якість її роботи шляхом математичного моделювання в середовищі Simulink. Результати математичного моделювання показали, що запропонована САУ пристроєм РПН силового трансформатора має перевагу над класичною САУ РПН за рахунок зниження не лише рівня відхилення напруги δU_1 , а й рівня несиметрії напруги по зворотній послідовності K_2 .

Список літератури: 1. Плесиков П.Г. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм / П.Г. Плесиков, В.В. Зінзура, М.В. Кубкін // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 24. – Ч. 2. – Кіровоград: КНТУ, 2011. – С. 164-173. 2. Зінзура В.В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 25.Ч.1. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 350-360.



Зінзура Василь Васильович. Захистив диплом магістра в Кіровоградському державному технічному університеті у 2008 р. за спеціальністю “Електротехнічні системи електроспоживання”. З цього ж року навчається в аспірантурі КНТУ. Асистент кафедри “Електротехнічні системи” Кіровоградського національного технічного університету з 2011 р.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами регулювання напруги та зменшення втрат в електричних мережах.

Надійшла до редколегії 27.09.2012

УДК 621.316.1

Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора / Зінзура В.В. // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2012. – № 49 (955). – С. 99-109. Бібліогр.: 2 назв.

Разработана структурная схема системы автоматического управления устройством РПН силового трансформатора, использование которой позволяет одновременно снижать уровни отклонения и несимметрии напряжения по обратной последовательности в электрической сети с изолированной нейтралью, а так же исследовано качество работы предложенной системы путем математического моделирования в среде Simulink.

Ключевые слова: система автоматического управления, силовой трансформатора, математическое моделирование.

A block diagram of the automatic control system for the OLTC of the power transformer, the use of which permits to simultaneously reduce levels of deviation and voltage unbalance on the reverse sequence in the electrical network with isolated neutral is developed. It was also investigated the quality of the proposed system by mathematical simulation in Simulink.

Keywords: automatic control system, power transformer, mathematical modeling.

А.І. КОТИШ, канд. техн. наук, доц., КНТУ, Кіровоград

О.І. СІРІКОВ, канд. техн. наук, доц., КНТУ, Кіровоград

АНАЛІЗ СПОЖИВАННЯ ТА ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 0,38 КВ КОМУНАЛЬНО- ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В статті проведено аналіз споживання та втрат електроенергії комунально-побутовими споживачами. Запропоновано шляхи та заходи що до зменшення втрат із врахуванням сучасних умов експлуатації.

Ключові слова: споживання та втрати електроенергії, умови експлуатації.

Питанню раціонального споживання електроенергії в комунально-побутовому секторі приділяється незаслужено мало уваги. Хоча об'єм споживання електроенергії населенням України значно зріс, що призводить до її додаткових втрат. Фактичні втрати в мережах комунально-побутового сектору в окремих випадках досягають 30 % за рахунок додаткових комерційних втрат, обумовлених цілим рядом факторів:

- самовільне підключення споживачів;
- несплата чи несвоєчасність оплати споживачами отриманої електроенергії;
- махінації з приладами обліку;
- відсутність приладів обліку в місцях загального користування комунально-побутового сектору.

Технічний стан основних фондів підприємств комунальної енергетики характеризуються значною (більше 67 %) зношеністю, в зв'язку з тривалим (більше 20 років) терміном експлуатації. В той час, в зв'язку з зупинкою більшої частини великих промислових підприємств виникла зміна в структурі транспортування електричної енергії, а саме:

- зниження коефіцієнтів завантаження силових трансформаторів;
- збільшення протяжності і розгалуженості живлячої лінії 0,4 кВ;
- зміщення центрів електричних навантажень за рахунок більш інтенсивного розвитку комунально-побутового сектору порівняно з промисловістю;
- збільшення навантаження в побутовому секторі;
- ріст несиметрії навантаження фаз 0,4 кВ.

© Котиш А.І., Сіріков О.І., 2012

В житловому секторі практично відсутній контроль технічних втрат в мережах 0,4 кВ – роботи по їх визначенню і зниженню практично не ведуться. В той час в зв'язку з зростом енергоємності споживачів комунально-побутового сектору спостерігається перевантаженість живлячих ліній і, як наслідок, зріст навантажувальних втрат електричної енергії.

Для усунення зазначених негативних факторів необхідний науковий підхід з проведенням ряду організаційно-технічних заходів.

Населення – надійний споживач з попитом, що постійно зростає, на електроенергію. Так за даними [1, 2] на побудованій діаграмі (рис. 1) видно, що за останні роки споживання електроенергії населенням має стійку тенденцію зростання у загальному електробалансі держави. А по останнім даним Міністерства енергетики та вугільної промисловості України [3] частка споживання електроенергії населенням у 2011 році складає 25,6 %.

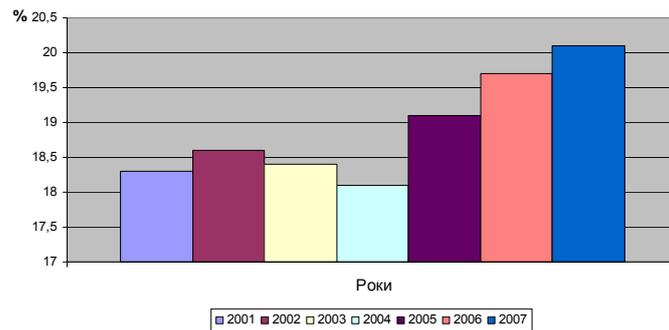


Рис. 1. Динаміка споживання електричної енергії населенням України.

Стійке зростання попиту житлового сектора в Україні обумовлено:

по-перше, зміною характеру і типу забудови міст: житлові масиви багатоквартирних багатоповерхових (понад 10 поверхів) будинків, що спричиняє за собою перехід на схему енергопостачання будинків введеннями двох видів енергії: електричної і теплової (у вигляді гарячої води);

по-друге, нарощуванням встановленої потужності побутової електроапаратури (пральні машини з підігрівом води, електропечі, пилососи, холодильники великих потужностей);

по-третє, насиченням квартир новим поколінням побутової електроапаратури: (мікрохвильові печі, електроводонагрівачі, кондиціонери, морозильні камери і т.д.)

в четверте широким розповсюдженням сучасної приміської забудови із використанням таких приладів як електрообігрів підлог, сауни,

джакузі посудомийні машини тощо.

Логічно буде зазначити, що в зв'язку з цим втрати в електричних мережах комунально-побутового призначення значно зростають. На рис. 2 показано структуру відпуску активної електричної енергії населенню по середньостатистичній міській ТП.

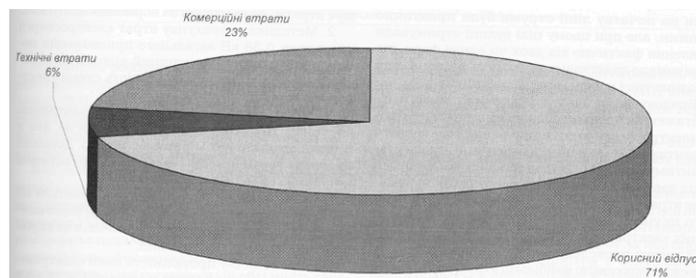


Рис. 2. Структура відпуску активної електроенергії в мережу 0,38 кВ.

На рис. 3 показано фактичний відпуск активної та реактивної електроенергії в мережу 0,38 кВ із шин цієї ж ТП за 9 місяців.

Як видно із рисунка, активне споживання електроенергії має сезонний характер і зростає в осінньо-зимовий період. Реактивне ж споживання практично незмінне, а його зниження в осінньо-зимовий період зумовлене сезонним зниженням напруги в мережі через зростання активного навантаження.

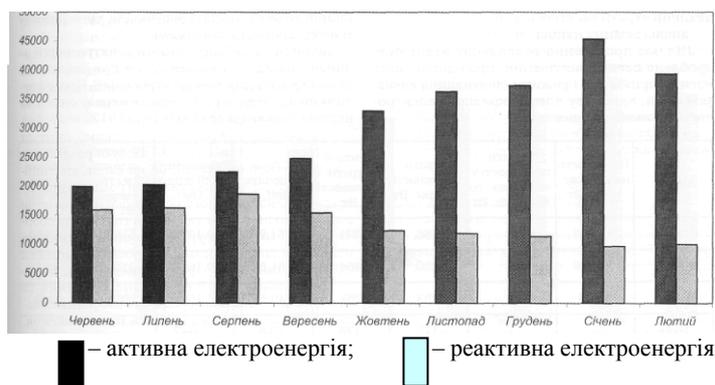


Рис. 3. Помісячний відпуск електроенергії в мережу 0,38 кВ.

За період дослідження значення $\cos \varphi$ змінювалося в межах від

0,769 до 0,978 (рис. 4). У літній період реактивне споживання співрозмірне з активним, що спричиняє додаткові втрати активної потужності та напруги в мережі. Отже, намірило питання про компенсацію реактивної потужності і в непромислових мережах низької напруги.

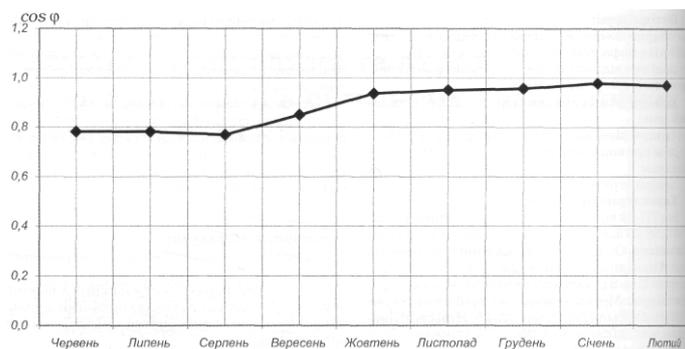


Рис. 4. Зміна значення $\cos \varphi$ за період дослідження

Для ліній даної ТП коефіцієнт додаткових втрат від несиметрії струмів по фазах становить 1,05-1,1, якщо розраховувати за струмами головної ділянки. Проте аналіз інших приєднань показав, що він може досягати значення 1,4 і вище. Втрати електроенергії тільки в нульовому проводі становили 14 %.

При аналізі несиметрії струмів було виявлено характерну помилку, яка допускається працівниками енергопостачальної організації під час симетрування навантажень. Це вирівнювання струмів по фазах тільки на початку лінії за рахунок перемикання частини споживачів на іншу фазу. При цьому вздовж лінії можуть залишатись значні перекося струмів. Зафіксовано випадки, коли на початку лінії струми були практично рівними, але при цьому цілі вулиці отримували живлення фактично від двох чи однієї фази, що спричиняло додаткові втрати на цих ділянках як у фазних так і в нульовому провідниках.

Окрім того в кожному конкретному випадку необхідно враховувати конфігурацію мережі (рис. 5).

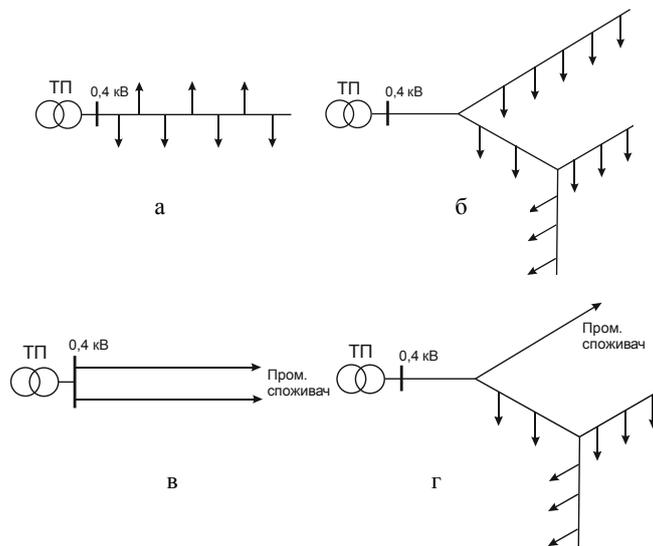


Рис. 5. Конфігурація електричних мереж комунально-побутового призначення: а – нерозгалужені лінії з рівномірно розподіленим вздовж ліній навантаженням (у більшості то міські кабельні лінії); б – розгалужені лінії з рівномірно розподіленим уздовж ділянок навантаженням (у більшості то сільські повітряні лінії); в – нерозгалужені лінії із навантаженням, зосередженим у кінці лінії (промислові лінії); г – розгалужені лінії зі змішаним навантаженням.

Підсумовуючи усе вище зазначене можливо зробити наступні висновки:

1. Методика розрахунку втрат електроенергії в мережах 0,38 кВ загального призначення повинна враховувати фактичний відпуск електроенергії в мережу та конфігурацію схеми електропостачання.

2. Побутові електроприймачі поряд з активною споживають і реактивну електроенергію, яка в літній період співрозмірна з активною. Доцільно впроваджувати заходи з компенсації реактивної потужності в мережах 0,38 кВ.

3. Симетрування навантажень у мережі 0,38 кВ необхідно здійснювати шляхом почергового вмикання однофазних електроприймачів, а не вирівнювання струмів у голові лінії.

4. Через значну протяжність ліній сільських електричних мереж режим напруг у віддалених електроприймачів не відповідає державному стандарту на електричну енергію.

Список літератури: 1. <http://www.energyexpert.com.ua>. 2. Держкий В.Г. Потребление электроэнергии населением / Скиба В.Ф., Чекаленко М.И. // Энергетика и электрификация. – 2008. – №4. – С.47-52. 3. <http://bin.ua/news/economics/faec> – данные минэнергоуголь 11.01.2012 (по материалам интерфакс Украины).



Котиш Андрій Іванович, кандидат технічних наук, доцент. Захистив диплом інженера в Кіровоградському інституті с/г машинобудування у 1995 р. за спеціальністю "Електропостачання". Дисертацію кандидата технічних наук захистив у 2002 р. в НТУ "ХП". Заступник завідувача кафедри "Електротехнічні системи" Кіровоградського національного технічного університету.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами підвищення надійності електричних мереж та електроенергетичного обладнання засобами автоматизації.



Сіріков Олександр Іванович, кандидат технічних наук. Захистив диплом магістра в Кіровоградському державному технічному університеті у 2003 р. за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання". Дисертацію кандидата технічних наук захистив у 2009 р. в НТУ "ХП". Доцент кафедри "Електротехнічні системи" Кіровоградського національного технічного університету.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами діагностики стану забрудненої високовольтної ізоляції, підвищення ефективності електропостачання електричних машин.

Поступила в редколегію 26.09.2012

УДК 621.311.1

Аналіз споживання та втрат електроенергії в електричних мережах 0,38 кВ комунально-побутового призначення / Котиш А.І., Сіріков О.І. // Вісник НТУ "ХП". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХП", 2012. – № 49 (955). – С. 110-115. Бібліогр.: 3 назв.

В статті проведено аналіз споживання і втрат електроенергії комунально-бытовими потребителями. Предложено пути и мероприятия по снижению потерь, с учетом современных условий эксплуатации.

Ключевые слова: потребление и потери электроэнергии, условия эксплуатации.

In the paper the analysis of consumption and losses of electric power by municipal customers is carried out. Ways and measures for reduction of the losses, taking into account contemporary operating conditions are proposed.

Keywords: energy consumption and energy losses, operating conditions.

М.В. КУБКІН, асистент, КНТУ, Кіровоград

ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ДО ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

Визначено функції чутливості системи вимірювання високої напруги до зміни параметрів вимірювальних перетворювачів струму та напруги, а також параметрів пристрою компенсації спаду напруги. Надані рекомендації, щодо побудови таких систем

Ключові слова: функція чутливості, вимірювальні перетворювачі, пристрій компенсації.

Вступ. В [1] була запропонована система вимірювання напруги на базі трансформатора власних потреб (ТВП) та розглянуті її метрологічні характеристики. У вищезазначеній системі в якості первинного вимірювального перетворювача використовується ТВП спад напруги в якому компенсується за допомогою пристрою компенсації. Така система дозволить відмовитись від використання трансформаторів напруги 6-10 кВ в розподільчих пристроях, що значно спростить та здешевле останні.

Постановка задачі. Під час експлуатації параметри елементів системи вимірювання можуть змінюватись. Ці зміни певним чином будуть впливати на передавальну функцію (ПФ) всієї системи, а отже, і на її метрологічні характеристики. Таким чином виникає задача оцінки впливу зміни параметрів елементів системи вимірювання на точність її роботи.

Аналіз публікацій. Для характеристики такого впливу вводять поняття "чутливість". Чутливість оцінюють за допомогою функції чутливості [2]

$$T_k(s) = \frac{\partial W(s)}{\partial W_k(s)},$$

де $W(s)$ – ПФ системи; $W_k(s)$ – ПФ k -го елемента системи.

Частіше використовують логарифмічну функцію чутливості [2, 3, 4]

$$S_k(s) = \frac{\partial \ln W(s)}{\partial \ln W_k(s)} = \frac{\partial W(s)}{\partial W_k(s)} \frac{W_k(s)}{W(s)}, \quad (1)$$

тобто чутливість представляє собою відношення відносних змін ПФ системи та ПФ елемента, що змінюється. З (1) видно, що чим менша чутливість $S_k(s)$, тим менше впливає зміна $W_k(s)$ на $W(s)$.

© Кубкін М.В., 2012

Для визначення чутливості ПФ системи до зміни певного параметра α в передавальній функції $W_k(s)$ використовують правило диференціювання складної функції [3]

$$S_k^\alpha(s) = S_k(s)S_\alpha(s) = \frac{\partial W(s)}{\partial W_k(s)} \frac{W_k(s)}{W(s)} \cdot \frac{\partial W_k(s)}{\partial \alpha} \frac{\alpha}{W_k(s)}. \quad (2)$$

Мета статті. Визначити функції чутливості для ПФ системи вимірювання високої напруги на базі ТВП.

Основна частина. Структурна схема системи вимірювання високої напруги наведена на рис. 1. Тут $W_{TU}(s)$, $W_{TV}(s)$ – ПФ ТВП за вторинними напругою та струмом відповідно; $W_{TV}(s)$, $W_{TI}(s)$ – ПФ первинних вимірювальних перетворювачів напруги та струму відповідно; $W_{ПК}(s)$ – ПФ пристрою компенсації (ПК).

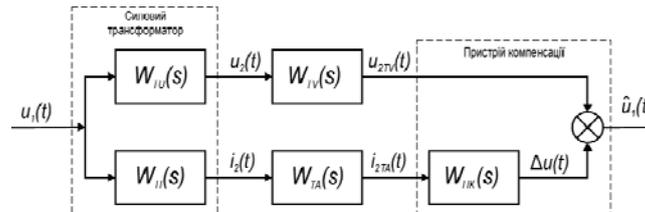


Рис. 1. Структурна схема системи вимірювання

Згідно структурної схеми ПФ системи вимірювання буде

$$W(s) = \frac{\mathcal{E}_1(s)}{U_1(s)} = W_{TU}(s)W_{TV}(s) + W_{TI}(s)W_{TA}(s)W_{ПК}(s). \quad (3)$$

З огляду на (1) та (3) очевидно, що функція чутливості системи вимірювання до зміни параметрів вимірювального перетворювача напруги TV (функція чутливості за каналом напруги) буде:

$$S_u(s) = S_{TV}(s) = \frac{W_{TU}(s)W_{TV}(s)}{W_{TU}(s)W_{TV}(s) + W_{TI}(s)W_{TA}(s)W_{ПК}(s)},$$

а функція чутливості до зміни параметрів вимірювального перетворювача струму TA або пристрою компенсації ПК (функція чутливості за каналом струму) –

$$S_i(s) = S_{TA}(s) = S_{ПК}(s) = \frac{W_{TI}(s)W_{TA}(s)W_{ПК}(s)}{W_{TU}(s)W_{TV}(s) + W_{TI}(s)W_{TA}(s)W_{ПК}(s)}.$$

ПФ пристрою компенсації [1]:

$$W_{ПК}(s) = R_T + sL_T,$$

де R_T, L_T – відповідно активний опір та індуктивність ТВП.

Функція чутливості системи при зміні параметрів R_T, L_T згідно (2):

$$S_i^R(s) = S_{ПК}(s)S_{R_T}(s) = \frac{W_{TI}(s)W_{TA}(s)W_{ПК}(s)}{W_{TU}(s)W_{TV}(s) + W_{TI}(s)W_{TA}(s)W_{ПК}(s)} \cdot \frac{R_T}{R_T + sL_T},$$

$$S_i^L(s) = S_{ПК}(s)S_{L_T}(s) = \frac{W_{TI}(s)W_{TA}(s)W_{ПК}(s)}{W_{TU}(s)W_{TV}(s) + W_{TI}(s)W_{TA}(s)W_{ПК}(s)} \cdot \frac{sL_T}{R_T + sL_T}.$$

В якості прикладу розглянемо функції чутливості (рис. 2) $S_u(s), S_i(s), S_i^R(s), S_i^L(s)$ системи вимірювання на базі силового трансформатора ТМ-100/10 ($P_2 = 100$ кВт, $\cos\varphi_2 = 0,8$). Клас точності вимірювальних перетворювачів струму та напруги $f_U = f_I = 0,005$.

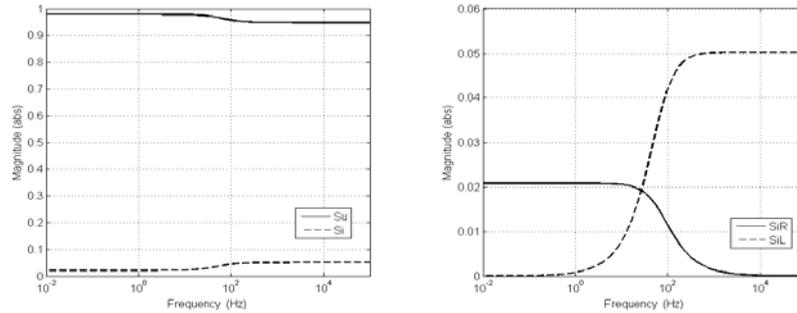


Рис. 2. Графіки модулів функцій $S_u(s), S_i(s), S_i^R(s), S_i^L(s)$

З наведених частотних характеристик видно: 1) що відносна зміна параметрів (а по суті точності) вимірювального перетворювача напруги призведе до майже рівнозначної ($|S_u| \approx 1$) відносної зміни точності системи вимірювання; 2) відносна варіація параметрів вимірювального перетворювача струму та пристрою компенсації викликає відносні відхилення точності системи вимірювання з коефіцієнтом значно меншим за одиницю ($|S_i| \ll 1$).

Висновки.

1. Визначено функції чутливості системи вимірювання високої напруги на базі трансформатора власних потреб.

2. Аналіз отриманих функцій показав, що при проектуванні таких систем вимірювання необхідно в першу чергу приділяти увагу класу точності первинного вимірювального перетворювача напруги. До кла-

су точності вимірювального перетворювача струму та параметрів пристрою компенсації вимоги можуть бути менш жорсткими.

Список літератури: 1. *Кубкін М.В.* Система вимірювання високої напруги на базі силового трансформатора та її метрологічні характеристики // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 25. Ч.1. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 391-399. 2. *Ванин В.К.* Релейная защита на элементах вычислительной техники / В.К. Ванин, Г.М. Павлов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 336 с. 3. *Дорф Р.* Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с. 4. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебн. в 5 тт. Т. 3 / [Пупков К.А., Егунов Н.Д., Владимиров И.Г. и др.]; под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егунова. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.



Кубкін Максим Володимирович. Захистив диплом магістра в Кіровоградському державному технічному університеті у 2003 р. за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання". Асистент кафедри "Електротехнічні системи" Кіровоградського національного технічного університету з 2003 р.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами математичного та комп'ютерного моделювання в електроенергетиці.

Надійшла до редколегії 20.09.2012

УДК 621.317.32.027.3:621.3.088.3

Оцінка чутливості системи вимірювання високої напруги до зміни параметрів її елементів / Кубкін М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 116-119. Бібліогр.: 4 назв.

Определены функции чувствительности системы измерения высокого напряжения к изменениям параметров измерительных преобразователей тока и напряжения, а также к изменению параметров устройства компенсации падения напряжения.

Ключевые слова: функция чувствительности, измерительные преобразователи, устройство компенсации.

The functions of the sensitivity of high-voltage measurement system to the parametric variation of voltage and current measuring transducers as well as the parameters of the device for the compensation of voltage drop are defined in the paper.

Keywords: function of the sensitivity, measuring transducers, device for compensation.

Ю.А. СИРОТИН, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харків

НЕУРАВНОВЕШЕННЫЙ И НЕСБАЛАНСИРОВАННЫЙ РЕЖИМЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ЦЕПИ

Наряду с неуравновешенным режимом для несинусоидальных процессов введен несбалансированный режим. Показано, как эти режимы определяются при синусоидальных процессах через комплексные мощности. Получены два дуальных уравнения комплексных мощностей для рассматриваемых режимов.

Ключевые слова: мгновенные и комплексные степени, пульс и несбалансированный режим, мощность уравнений, трехфазные четырехпроводные цепи.

В многофазной цепи с симметричными синусоидальными напряжениями и токами (в симметричном режиме) мгновенная мощность (ММ) не имеет переменной (пульсирующей) компоненты – режим *уравновешен* [1]. В реальной ситуации нарушение, как симметрии напряжений, так и симметрии токов приводит к пульсации ММ. Режим (синусоидальный или несинусоидальный) *неуравновешен*, если ММ имеет колебательную (пульсирующую) компоненту.

Мгновенная мощность (в многофазной цепи определяется как скалярное произведение векторов мгновенных напряжений и токов) не полностью определяет характер потока энергии. В трехфазной цепи *векторная* ММ (векторное произведение векторов мгновенных фазных напряжений и токов) дополнительно характеризует энергетические процессы. Векторная ММ интерпретируется как *неактивная мгновенная мощность*. Если *неактивная* ММ имеет колебательную составляющую – режим *несбалансирован*.

В многофазной цепи процессы синусоидального режима определены векторами комплексных действующих величин (*д.в.*) тока и напряжения, которые определяют *комплексные мощности* (КМ) сбалансированного и несбалансированного режимов. Стандартная КМ определяется как комплексное скалярное произведение (СП) векторов комплексных *д.в.* напряжений и токов. *Векторное* произведение (ВП) векторов комплексных *д.в.* напряжений и токов определяет – комплексный вектор мощности небаланса.

© Сиротин Ю.А., 2012

Покажем, что квадратичное разложение полной (кажущейся) мощности на активную и реактивную мощности при несбалансированном синусоидальном режиме должно быть дополнено мощностью небаланса, а мощность пульсаций ММ входит в другое уравнение мощности. В работе получены формулы представления скалярной и векторной ММ через введенные комплексные мощности.

Уравновешенный и сбалансированный режим

При измерении напряжения в сечении $\langle a, b, c \rangle$ относительно нейтрали 4-проводной цепи (рис. 1) ММ определена как

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = \mathbf{i} \cdot \mathbf{u}, \quad (1)$$

где \cdot – знак транспонирования.

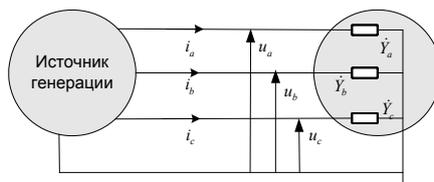


Рисунок. Четырехпроводная цепь

В каждый момент времени ММ равна *скалярному произведению*, которое вычисляется как произведение $\mathbf{i} \cdot \mathbf{u}$ вектор строки мгновенных значений (*м.з.*) тока на вектор столбец *м.з.* напряжения

$$\mathbf{u}(t) = (u_a(t), u_b(t), u_c(t))', \quad \mathbf{i} = (i_a(t), i_b(t), i_c(t))'. \quad (2)$$

Полагая, что процессы периодические, можно корректно определить среднее ММ и выделить переменную составляющую

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt, \quad p(t) = \bar{p} + \tilde{p}(t). \quad (3)$$

В общем случае $\tilde{p} = p(t) - \bar{p} \neq 0$ и режим *неуравновешен*. Симметричный режим *уравновешен*. Обратное утверждение не верно. Симметричный режим может быть обеспечен и при несимметричной нагрузке. Так, схема Штейнитца подключения одноплечевой нагрузки несимметрична, однако обеспечивает симметричный режим [2].

ММ – скалярная величина не единственная мгновенная характеристика наблюдаемого энергетического процесса. Уточняющую характеристику энергетических процессов дает *векторная* ММ (ВП векторов мгновенных фазных напряжений и токов) [3].

$$\mathbf{q} = \mathbf{u} \times \mathbf{i} = [u_b i_c - u_c i_b \quad u_c i_a - u_a i_c \quad u_a i_b - u_b i_a]^T. \quad (4)$$

Подобно (3) можно выделить векторную постоянную и переменную составляющие $\mathbf{q} = \mathbf{q}(t) = \bar{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}}(t)$. Режим, при котором векторная ММ не имеет переменной составляющей $\tilde{\mathbf{q}} = \tilde{\mathbf{q}}(t) \equiv 0$ будем называть *сбалансированным* режимом. Векторная ММ интерпретируется как *неактивная* ММ. Чтобы подчеркнуть это скалярную ММ называют *активной* ММ. В каждый момент времени справедливо тождество [4]

$$[\mathbf{u} \times \mathbf{i}]^T [\mathbf{u} \times \mathbf{i}] = \begin{vmatrix} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) & (\mathbf{u} \cdot \mathbf{i}) \\ (\mathbf{u} \cdot \mathbf{i}) & (\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}) \end{vmatrix} \quad (5)$$

Тождество (5) дает *уравнение мощности* для мгновенных величин [3].

$$s^2(t) = p^2(t) + q^2(t). \quad (6)$$

Здесь использованы стандартные обозначения для: скалярных квадратов векторов м.з. напряжений и токов

$$u^2(t) = |\mathbf{u}(t)|^2 = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}), \quad i^2(t) = |\mathbf{i}(t)|^2 = (\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}); \quad (7.a)$$

квадратов мгновенных мощностей: активной, неактивной, и полной

$$p^2(t) = |(\mathbf{i} \cdot (t)\mathbf{u}(t))|^2, \quad q^2(t) = \mathbf{q}(t) \cdot \mathbf{q}(t) = [\mathbf{i} \times \mathbf{u}]^T [\mathbf{i} \times \mathbf{u}] \quad (7.б)$$

$$s^2(t) = u^2(t)i^2(t). \quad (7.в)$$

Синусоидальный режим и 3-комплексы

Мгновенные значения синусоидальных процессов напряжения и тока

$$\mathbf{u}(t) = \sqrt{2}\Re[\mathbf{U}e^{j\omega t}], \quad \mathbf{i}(t) = \sqrt{2}\Re[\mathbf{I}e^{j\omega t}] \quad (8)$$

однозначно определены трехмерными *комплексными* векторами (3-комплексами) напряжения $\mathbf{U} = (\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)^T$ и тока $\mathbf{I} = (\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c)^T$ – векторами комплексных д.в.:

$$\mathbf{U} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T \mathbf{u}(t)e^{-j\omega t} dt, \quad \mathbf{I} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T \mathbf{i}(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (9)$$

где T – период ($T\omega=2\pi$).

Комплексное СП 3-комплексов (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) и определено как произведение матрицы-строки $\mathbf{X}^T = (\dot{X}_a, \dot{X}_b, \dot{X}_c)$ на *комплексно сопряженную* (КС) матрицу-столбец $\mathbf{Y}^* = (Y_a^*, Y_b^*, Y_c^*)^T$

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}^* = \dot{X}_a Y_a^* + \dot{X}_b Y_b^* + \dot{X}_c Y_c^*, \quad (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = (\mathbf{Y}, \mathbf{X})^*. \quad (10)$$

3-комплексы \mathbf{X} и \mathbf{Y} ортогональны, если их комплексное скалярное произведение равно нулю

$$\mathbf{X} \perp \mathbf{Y} \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{X}^* \mathbf{Y}^* = 0. \quad (11)$$

Мгновенные мощности синусоидального режима

При синусоидальных процессах ММ (1) можно представить как

$$p(t) = \mathbf{u}(t)^T \mathbf{i}(t) = \Re e[\dot{S} + \dot{N}e^{j2\omega t}] \quad (12)$$

Стандартная комплексная мощность (КМ)

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{U}_a I_a^* + \dot{U}_b I_b^* + \dot{U}_c I_c^* = \mathbf{U}^T \mathbf{I}^* = (\mathbf{U}, \mathbf{I}) \quad (13)$$

равна комплексному СП комплексов напряжения \mathbf{U} и тока \mathbf{I} [5].

Реальная часть стандартной КМ равна средней мощности за интервал наблюдения $[\tau, \tau + T]$

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt, \quad \bar{p} = \Re e \dot{S} = P. \quad (14)$$

Мнимая часть КМ $\Im m \dot{S} = Q$ определяет реактивную мощность синусоидального режима.

Осциллирующая составляющая ММ

$$\tilde{p} = \Re e[\dot{N}e^{j2\omega t}] = N \cos(2\omega t + \arg \dot{N}) \quad (15.a)$$

однозначно определена комплексной амплитудой пульсаций активной ММ (комплексной мощностью пульсаций)

$$\dot{N} = \dot{U}_a \dot{I}_a + \dot{U}_b \dot{I}_b + \dot{U}_c \dot{I}_c = \mathbf{I}^T (\mathbf{U}^*)^* = (\mathbf{I}, \mathbf{U}^*), \quad (15.б)$$

которая равна комплексному СП [5] вектора тока и (КС) 3-комплекса напряжения $\mathbf{U}^* = [U_a^* \ U_b^* \ U_c^*]^T$.

Из (3) и (15) следует, что синусоидальный режим уравновешен, если выполняется одно из эквивалентных утверждений

$$\tilde{p} = \Re e[\dot{N}e^{j2\omega t}] \equiv 0 \Leftrightarrow \dot{N} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{U}^* \perp \mathbf{I}. \quad (16)$$

При симметричном напряжении прямой последовательности, режим уравновешен, если ток не содержит обратную последовательность.

ВП 3-комплексов \mathbf{X} и \mathbf{Y} определяется также как ВП для вещественных 3-векторов. Комплексы \mathbf{X} and \mathbf{Y} параллельны (коллинеарны $\mathbf{X} \parallel \mathbf{Y}$), если их координаты комплексно пропорциональны или ВП равно нулю

$$\mathbf{X} \parallel \mathbf{Y} \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} \mathbf{X} = \dot{\lambda} \mathbf{Y} \ (\dot{\lambda} \neq 0) \Leftrightarrow [\mathbf{X} \times \mathbf{Y}] = 0. \quad (17)$$

Если в синусоидальном режиме активная ММ характеризуется двумя известными комплексными скалярным произведениями: стандартной КМ (13) и мощностью пульсации (15.б), то неактивная ММ

(4) – векторная величина и (можно показать, что) в синусоидальном режиме

$$\mathbf{q} = \mathbf{u} \times \mathbf{i} = \Re e[\mathbf{U} \times \mathbf{I}^* + (\mathbf{U} \times \mathbf{I})e^{j2\omega t}] \quad (18)$$

представляется двумя новыми векторными комплексными мощностями: ВП 3-комплексов напряжения и тока и ВП 3-комплекса напряжения и КС 3-комплекса тока

$$\mathbf{D} = \mathbf{U} \times \mathbf{I} \quad , \quad \mathbf{K} = \mathbf{U} \times \mathbf{I}^* \quad . \quad (19)$$

Векторная ММ может быть записана как

$$\mathbf{q} = \underbrace{\Re e[\mathbf{K}]}_{\bar{q}} + \underbrace{\Re e[\mathbf{D}e^{j2\omega t}]}_{\tilde{q}} \quad (20)$$

Что дает явное представление для постоянной и переменной составляющих в синусоидальном режиме

$$\bar{q} = \Re e[\mathbf{K}] \quad , \quad \tilde{q}(t) = \Re e[\mathbf{D}e^{j2\omega t}] \quad (21)$$

Из (17) и (21) следует, что синусоидальный режим *сбалансирован* если выполняется одно из эквивалентных утверждений

$$\tilde{q}(t) = \Re e[\mathbf{D}e^{j2\omega t}] \equiv 0 \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{D} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{U} \parallel \mathbf{I} \quad . \quad (22)$$

Поэтому вектор $\mathbf{D} = \mathbf{U} \times \mathbf{I}$ может быть назван 3-комплексом (вектором) мощности *небаланса* [6]. При несимметричном напряжении и симметричной нагрузке $\mathbf{U} \parallel \mathbf{I}$ и синусоидальный режим сбалансирован (однако неуравновешен).

Уравнения мощности несбалансированного и неуравновешенного синусоидального режимов

Операции сложения и умножения для вещественных и комплексных чисел обладают одинаковыми свойствами. Поэтому *тождество* векторной алгебры (5) остается справедливым и для комплексных векторов. Следует только вместо вещественного скалярного произведения использовать комплексное СП. Можно показать, что

$$[\mathbf{X} \times \mathbf{Y}] \cdot [\mathbf{X}^* \times \mathbf{Y}^*] = \begin{vmatrix} (\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^*) & (\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}^*) \\ (\mathbf{Y} \cdot \mathbf{X}^*) & (\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^*) \end{vmatrix} \quad (23.a)$$

Откуда имеем

$$|\mathbf{X} \times \mathbf{Y}|^2 = |\mathbf{X}|^2 |\mathbf{Y}|^2 - |\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}^*|^2 \quad . \quad (23.б)$$

Здесь и дальше использованы стандартные обозначения для скалярных квадратов комплексного СП (10)

$$X^2 = |\mathbf{X}|^2 = \mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^* \quad , \quad Y^2 = |\mathbf{Y}|^2 = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^* \quad , \quad (24)$$

и очевидные свойства операции комплексного сопряжения

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{X}^* = (\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}^*)^* \quad , \quad |\mathbf{X} \times \mathbf{Y}|^2 = (\mathbf{X} \times \mathbf{Y}) \cdot (\mathbf{X} \times \mathbf{Y})^* \quad . \quad (25)$$

Полагая $X = I$, $Y = U$ из (23) получим

$$|I|^2 |U|^2 = \dot{S} S^* + D \cdot D^* . \quad (26)$$

Что дает квадратичное разложение [5,6] полной (кажущейся) мощности по Бухгольцу $S_B = |U| |I| = U \cdot I$ на две компоненты

$$S_B^2 = S_G^2 + D_u^2 . \quad (27)$$

Здесь и дальше: $S_G = |U \cdot I^*| = \sqrt{\dot{S} S^*} = \dot{S}$ – геометрическая мощность, равная модулю стандартной КМ; $D_u = |D| = \sqrt{D \cdot D^*}$ – норма 3-комплекса небаланса.

Так как $S_G^2 = P^2 + Q^2$, из (27) имеем уравнение мощности для оценки дополнительных потерь в несбалансированном режиме

$$S_B^2 = P^2 + \underbrace{Q^2 + D_u^2}_{\text{дополнительные потери}} . \quad (28)$$

В синусоидальном режиме дополнительные потери обусловлены не только реактивной мощностью, но и небалансом режима. Коэффициент мощности при этом равен

$$\lambda = \frac{P}{S_B} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D_u^2}} . \quad (29)$$

Полагая $X = I$, $Y = U^*$ из (23) имеем другое *квадратичное разложение полной мощности для оценки неуровновешенности режима* [6]

$$|I|^2 |U|^2 = \dot{N} N^* + K \cdot K^* , \quad S_B^2 = N^2 + K^2 . \quad (30)$$

3-комплекс $K = U \times I^*$ можно назвать вектором *непульсирующей* мощности неуровновешенного режима и определить коэффициент пульсации

$$r = \frac{N}{S_B} = \frac{N}{\sqrt{N^2 + K^2}} . \quad (31)$$

Таким образом, уравновешенный и сбалансированный режим – различные энергетические понятия. Сбалансированный режим может быть неуровновешенным и наоборот. Однако введенные мощности разложения (30) связаны с мощностями разложения (28) [6].

Вычислительные формулы при симметричном напряжении

В четырехпроводной схеме (рис. 1) с несимметричной линейной нагрузкой и симметричным напряжением источника генерации 3-комплекс прямой последовательности

$$U = \tilde{U}(1, \alpha^*, \alpha)^* , \quad (\alpha = e^{j2\pi/3}) , \quad (32)$$

определен базовой величиной напряжения на одну фазу $\tilde{U} = |U|/\sqrt{3}$.
3-комплекс тока и его скалярный квадрат определяются через проводимости нагрузки

$$\mathbf{I} = \tilde{U}(\dot{Y}_a, \alpha^* \dot{Y}_b, \alpha \dot{Y}_c), \quad |\mathbf{I}|^2 = Y^2 \tilde{U}^2, \quad (33)$$

где $Y^2 = (|\dot{Y}_a|^2 + |\dot{Y}_b|^2 + |\dot{Y}_c|^2)$.

Тогда для КМ (14) и мощности пульсаций (15.б) получим
 $\dot{N} = \mathbf{I}^T \mathbf{U} = (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b \alpha + \dot{Y}_c \alpha^*) \tilde{U}^2, \quad S^* = \mathbf{I}^T \mathbf{U}^* = (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c) \tilde{U}^2$ (34)

Для векторов мощности (19) имеем
 $D = U \times I = \tilde{U}^2 [(\dot{Y}_b - \dot{Y}_c), (\dot{Y}_c - \dot{Y}_a) \alpha, (\dot{Y}_a - \dot{Y}_b) \alpha^*]$. (35)

$$\mathbf{K} = \mathbf{I} \times \mathbf{U}^* = \tilde{U}^2 [\dot{Y}_b \alpha - \dot{Y}_c \alpha^*, \dot{Y}_c \alpha - \dot{Y}_a \alpha^*, \dot{Y}_a \alpha - \dot{Y}_b \alpha^*]. \quad (36)$$

Что для их квадратов дает

$$|\mathbf{D}|^2 = \tilde{U}^4 [|\dot{Y}_b - \dot{Y}_c|^2 + |\dot{Y}_c - \dot{Y}_a|^2 + |\dot{Y}_a - \dot{Y}_b|^2] \quad (37)$$

$$|\mathbf{K}|^2 = \tilde{U}^4 [|\dot{Y}_b - \alpha \dot{Y}_c|^2 + |\dot{Y}_c - \alpha \dot{Y}_a|^2 + |\dot{Y}_a - \alpha \dot{Y}_b|^2] \quad (38)$$

Примеры неуровновешенного и несбалансированного режимов

В рассматриваемых ниже примерах все величины приведены в относительных единицах. Базовые величины на одну фазу: проводимости \tilde{Y} , напряжение \tilde{U} , ток \tilde{I} , мощности \tilde{W} удовлетворяют соотношениям $\tilde{W} = \tilde{U} \cdot \tilde{I} = \tilde{Y} \cdot \tilde{U}^2$.

Нагрузка задана проводимостями фаз (табл. 1) и выбрана так, что реактивная мощность равна нулю ($Q = 0$).

Таблица 1 – Проводимости фаз

№	1	2	3	4
\dot{Y}_A	0	\tilde{Y}	$2 \tilde{Y}$	\tilde{Y}
\dot{Y}_B	$\tilde{Y} e^{-j30^\circ}$	0	\tilde{Y}	$-j \tilde{Y}$
\dot{Y}_C	$\tilde{Y} e^{-j30^\circ}$	0	\tilde{Y}	$j \tilde{Y}$

Пример 1. Уравновешенный, но несбалансированный режим

Несмотря на то, что нагрузка несимметрична, режим уравновешен (ток обратной последовательности равен нулю). Однако – режим не-

сбалансирован (имеется ток нулевой последовательности).

Пример 2. Однофазная чисто активная нагрузка. Цепь ведет себя как однофазная с чисто активной нагрузкой $p(t) = \tilde{W}[1 + \cos 2\omega t]$.

Пример 3. Чисто активная несимметричная нагрузка. Поток энергии однонаправленный $p(t) = 3\tilde{W}[1 + 0,5 \cos 2\omega t]$.

Пример 4. Неуравновешенный режим с обменом энергии. Амплитуда переменной составляющей ММ в два раза превосходит активную мощность. Поток энергии двунаправленный $p(t) = \tilde{W}[1 + (1 + \sqrt{3})\cos 2\omega t]$. Результаты расчета сведены в табл.2.

Таблица 2 – Результаты расчета

№	1	2	3	4
$ I $	$\sqrt{2}\tilde{I}$	\tilde{I}	$(3/\sqrt{2})\tilde{I}$	$\sqrt{3}\tilde{I}$
$P = \Re e \dot{S}$	$\sqrt{3}\tilde{W}$	\tilde{W}	$3\tilde{W}$	\tilde{W}
$D_u = U \times I $	$\sqrt{3}\tilde{W}$	$\sqrt{2}\tilde{W}$	$(3/\sqrt{2})\tilde{W}$	$2\sqrt{2}\tilde{W}$
$S_B = I \parallel U $	$\sqrt{6}\tilde{W}$	$\sqrt{3}\tilde{W}$	$3\sqrt{3/2}\tilde{W}$	$3\tilde{W}$
$N = I \cdot U $	0	\tilde{W}	$(3/2)\tilde{W}$	$(1 + \sqrt{3})\tilde{W}$
$ K = I \times U^* $	$\sqrt{6}\tilde{W}$	$\sqrt{2}\tilde{W}$	$(3\sqrt{5}/2)\tilde{W}$	$(\sqrt{5} - 2\sqrt{3})\tilde{W}$
$\lambda = P/S_B$	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{3}$	$\sqrt{2/3}$	$1/3$
$\lambda_r = N/S_B$	0	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{6}$	$1/3 + 1/\sqrt{3}$

Можно проверить, что мощности в представленных примерах удовлетворяют полученным выше уравнениям.

Выводы. Предложенный метод позволяет оценивать режимы, создаваемые подключаемыми нагрузками, как однофазными, так и трехфазными. Проведенный анализ позволяет разрабатывать устройства улучшающие режимы энергопотребления [2].

Список литературы: 1. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин. – М.-Л.: "Госэнергоиздат", 1955. – 216 с. 2. Sirotin. Iu. A. Fryze's compensator and Fortescue transformation. / Iu.A. Sirotin // "Przeglad Elektrotechniczny" (Electrical Review). – 2011. – Vol. 1. – Pp. 101-106. – Режим доступа: http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=4568. 3. F.Z. Peng, J.S. Lai. Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1996. – Vol. 45, No.1, Feb. – Pp. 293-297. 4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука,

1973. – 832 с. 5. *Сиротин Ю.А.* Мощность разбаланса и пульсации мгновенной мощности при симметричном напряжении / *Ю.А. Сиротин* // Электрика. – 2009. – № 11. – С. 15-21, <http://www.nait.ru/journals>. 6. *Сиротин Ю.А.* Ток, мощность и уравнение пульсаций в трехфазной системе / *Ю.А. Сиротин* // Вісник НТУ "ХПИ", Сб. науч. трудов. Темат. вып.: Энергетика: надежность и энергоэффективность. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – №. 23, – С. 146-159. www.nbuu.gov.ua/portal/natural/vcpi/Ente/2012_23/19.pdf



Ю.А. Сиротин, к.т.н., доцент. В 1973 г. окончил механико-математический факультет Харьковского государственного университета им. М. Горького. Работал в различных НИИ как разработчик алгоритмов и математических моделей электрических устройств и систем. В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию по радиолокации и радионавигации в Военной радиотехнической академии им. Говорова (Харьков). С 1994 г. преподавал высшую математику в Харьковском военном университете. С 2004 года работает на кафедре автоматизации энергосистем НТУ "ХПИ". Область научных интересов в настоящее время: теория мощности, компенсация, качество поставки и потребления электроэнергии; математическое моделирование в электроэнергетике.

Надійшла до редколегії 24.09.2012

УДК 621.31

Неуравновешенный и несбалансированный режимы трехфазной четырехпроводной цепи / Сиротин Ю.А. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2012. – № 49 (955). – С. 120-128. Бібліогр.: 6 назв.

Для несинусоїдальних процесів поряд з неврівноваженим режимом введен небалансований режим. Показано, як ці режими визначаються при синусоїдальних процесах через комплексні потужності. Отримані два дуальних рівняння комплексних потужностей для розглянутих режимів.

Ключові слова: миттєві і комплексні ступені, пульс і небалансований режим, потужність рівнянь, трифазні чотирипровідні ланцюги.

Along with the pulse mode for non-sinusoidal processes, an unbalanced mode is introduced. How these modes are defined in terms of the complex powers at the sinusoidal processes is shown. Two dual complex power equations for the considered modes are obtained.

Keywords: instantaneous and complex powers, pulse and unbalanced mode, power equations, three-phase four-wire circuits.

О.В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"
Д.Н. БАКЛАЙ, ассистент кафедры ПЭЭ НТУ "ХПИ"
Т.А. ОСТРИКОВА, магистр кафедры ПЭЭ НТУ "ХПИ"

**РАСПОЗНАВАНИЕ ТИПА ДЕФЕКТА
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОБРАЗОВ ДЕФЕКТОВ,
ПОСТРОЕННЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ
В МАСЛЕ ГАЗОВ**

Предложена методика для распознавания образов возможных дефектов трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов, основанная на методе эталонов. Выполнена проверка предложенной методики на 75 трансформаторах, у которых в процессе эксплуатации были обнаружены дефекты. Доказана высокая эффективность предложенной методики.

Ключевые слова: дефекты трансформаторов, хроматографический анализ.

Введение. Распознавание типа возможного дефекта, является одним из важнейших этапов интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ). В настоящее время действующими отечественными [1] и зарубежными [2, 3] нормативными документами предусматривается использования следующих подходов, для определения типа дефектов:

- 1) критерий характерных газов;
- 2) критерий отношений пар газов;
- 3) графический метод построения образа дефектов.

В отличие от первых двух критериев, которые имеют четкие количественные границы и могут быть легко запрограммированы для распознавания в автоматическом режиме, реализация графического метода требует вмешательства оперативного персонала. Это обусловлено тем, что постановка диагноза, т.е., сравнение эталонного и эксплуатационных образов осуществляется вручную, другими словами, отсутствует методика для распознавания образов возможных дефектов трансформаторов.

© Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А., 2012

Отсутствие подобной методики, сильно ограничивает использование графического метода интерпретации результатов ХАРГ, в рамках единой информационно-аналитической системы, для диагностики состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования. В связи с этим разработка методики для распознавания графических образов дефектов трансформаторов является актуальной.

Цель статьи. В статье, предложена методика для распознавания графических образов дефектов трансформаторов, основанная на метрических методах распознавания образов.

Анализ публикаций. Графические образы разных дефектов были предложены для определения типа дефекта японскими исследователями [1]. Тип развивающихся в трансформаторах дефектов можно определить графически по основным газам: водороду, метану, этилену, этану и ацетилену. Метод был разработан на основе практического опыта сопоставления фактически выявленных дефектов в трансформаторе во время внутреннего осмотра с составом газов, выявленных методом ХАРГ. В то же время образы дефектов отображают наиболее общие зависимости в отношениях между отдельными газами, во время нагревания до различных температур или разрядных процессах.

Порядок построения графического образа дефекта [1]:

1. Графические образы дефектов строятся для оборудования, в котором концентрации отдельных газов или хотя бы одного из них превышают установленные для данного оборудования граничные значения;

2. По результатам ХАРГ из газов H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 выбирают газ, который имеет наибольшую абсолютную концентрацию. Для дефектов электрического характера основным газом может быть водород или ацетилен. Для дефектов термического характера основным газом является метан или этилен в зависимости от температуры нагрева в зоне развития дефекта;

3. Рассчитывают величину отношения каждого газа к газу с максимальной абсолютной концентрацией по углеводородным газам и водороду, причем для основного газа это отношение равно единице, отношение всех остальных газов меньше единицы;

4. Строятся графики. Для этого по оси X откладываются пять равных отрезков и обозначаются полученные точки соответствующими газами в следующей последовательности: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 . По оси Y откладывается отрезок произвольной величины, и обозначить его цифрой "1". Далее для каждого газа по оси Y необходимо отложить соответствующую величину отношения каждого газа к газу с максимальной абсолютной концентрацией;

5. Полученные точки соединить прямыми линиями. Построенный график сравнивается с эталонными графиками и определяется характер дефекта.

Приведенный метод достаточно прост и может быть использован для определения типа дефекта оборудования в автоматическом режиме. Однако для этого необходимо разработать методику сравнения эталонного образа с действительным.

Метод решения. Поскольку каждому из возможных дефектов трансформатора соответствует только один образ, т.е. области диагнозов не пересекаются, то целесообразно воспользоваться детерминистскими методами распознавания [4].

Полученные по результатам хроматографического анализа, а также эталонные образы дефектов можно представить в виде набора точек с координатами H_2/A_{\max} , CH_4/A_{\max} , C_2H_6/A_{\max} , C_2H_4/A_{\max} , C_2H_2/A_{\max} (в знаменателе находится газ с максимальной абсолютной концентрацией). Тогда вполне логично, для автоматического распознавания типа дефекта, использовать метод диагностики по расстоянию до эталона. В качестве меры расстояния можно использовать величину:

$$l = \sqrt{\left| H_2^* - \frac{H_2}{A_{\max}} \right|^v + \left| CH_4^* - \frac{CH_4}{A_{\max}} \right|^v + \left| C_2H_6^* - \frac{C_2H_6}{A_{\max}} \right|^v + \left| C_2H_4^* - \frac{C_2H_4}{A_{\max}} \right|^v + \left| C_2H_2^* - \frac{C_2H_2}{A_{\max}} \right|^v}, \quad (1)$$

где: A_{\max} – газ с максимальной концентрацией для эксплуатационного образа дефекта; * – концентрации газов для эталонных образов; v – мера расстояния.

В методе эталонов [4] отнесение предъявленного для распознавания объекта к одному из n диагнозов (состояний) совершается по наименьшему расстоянию до эталона. В качестве эталона для диагноза D_i принимается типичный объект, имеющий диагноз D_i (рис. 1) или образ, характерный для данного типа дефекта.

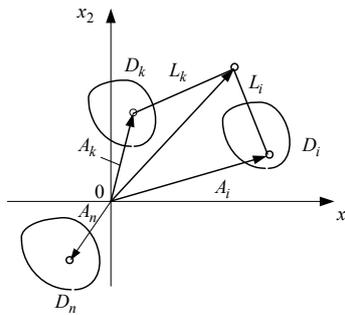


Рис. 1. Диагностика по расстоянию до эталона

Допустим, что в пространстве признаков используется диагностическая мера расстояния L до эталонных точек $a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*$. Объект x относят к диагнозу D_i , если мера расстояния между точками x, a_n^* минимально:

если $L_i = \min$, то $x \in D_i$

или в другой форме

$x \in D_i$, если $L_i < L_k$ ($k = 1, 2, \dots, n; k \neq i$).

В некоторых случаях условие принимается в более строгой форме $L_k - L_i > \varepsilon$, где ε – порог распознавания ($\varepsilon > 0$). Очевидно, что надежность распознавания будет тем выше, чем меньше расстояние L_i по сравнению с другими расстояниями. Это можно охарактеризовать коэффициентом распознавания:

$$\xi_i = \frac{1/L_i}{\sum_{s=1}^n 1/L_s}. \quad (2)$$

Величина ξ_i играет роль, сходную с вероятностью диагноза так как

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = 1. \quad (3)$$

Распознавание признается надежным, если $\xi_i > \xi_0$, и где ξ_0 – заранее выбранный уровень распознавания.

Чем больше коэффициент помех, тем ближе к предельной, граничной области располагается объект, предъявленный для распознавания.

Т.е. тип дефекта трансформатора, соответствует эталонному обра-

зу, если диагностическое расстояние между координатами образа для диагностируемого трансформатора и данного эталонного образа минимально. Определить значение меры расстояния ν можно из соображений обеспечения максимального значения коэффициента распознавания ξ .

Практическая реализация. Проиллюстрируем работу приведенной методики на примере трансформатора ПС "Постниково" Т-1, ТДТН-40/110/35/6. Значение концентраций растворенных в масле газов, для данного трансформатора приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС "Постниково" Т-1, % об.

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
30.09.1999	отс.	0,032	0,00046	0,177	0,0239	0,03	0,6

Как видно из таблицы концентрации метана, этилена и этана превысили граничные значения, рекомендуемые в [1]. Для определения характера возможного дефекта построим эксплуатационный образ дефекта, учитывая что, ключевым газом является этилен. Для этого находим отношения каждого из газов к этилену H₂/C₂H₄, CH₄/C₂H₄, C₂H₆/C₂H₄, C₂H₄/C₂H₄, C₂H₂/C₂H₄ и строим образ, рис. 2.

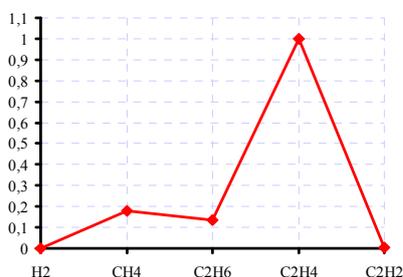


Рис. 2. Эксплуатационный образ предполагаемого дефекта в трансформаторе Постниково Т-1, ТДТН-40/110/35/6

На рис. 3. приведены эталонные образы дефектов [1] для ключевого газа этилен.

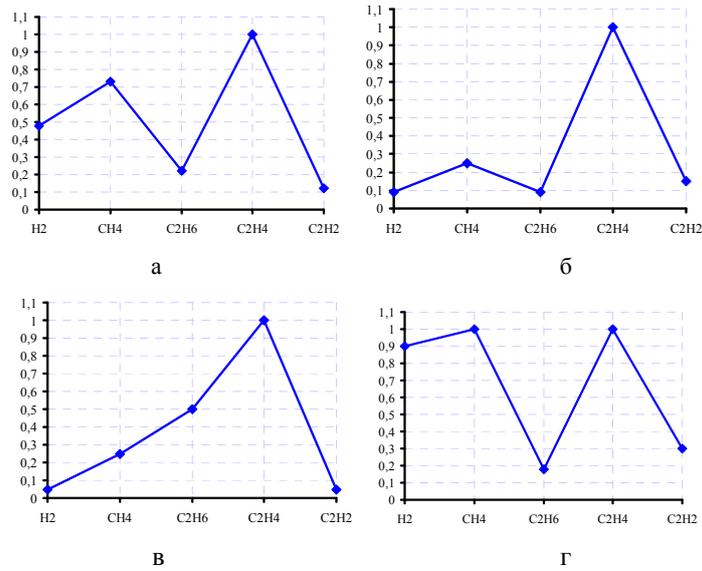


Рис. 3. Эталонные образы дефектов, ключевой газ этилен: а, б – высокотемпературный нагрев; в, г – нагрев переходящий в разряды

Определим значения диагностических расстояний между образом дефекта для трансформатора "Постниково" Т-2 и эталонными образами дефектов из рис. 3, используя для начала квадратичную меру расстояния:

$$l_{(x-a)} = \sqrt{\left(0,48 - \frac{0}{0,177}\right)^2 + \left(0,73 - \frac{0,032}{0,177}\right)^2 + \left(0,22 - \frac{0,0239}{0,177}\right)^2 + \left(1 - \frac{0,177}{0,177}\right)^2 + \left(0,12 - \frac{0,00046}{0,177}\right)^2} = 0,744.$$

$$l_{(x-b)} = \sqrt{\left(0,06 - \frac{0}{0,177}\right)^2 + \left(0,25 - \frac{0,032}{0,177}\right)^2 + \left(0,06 - \frac{0,0239}{0,177}\right)^2 + \left(1 - \frac{0,177}{0,177}\right)^2 + \left(0,12 - \frac{0,00046}{0,177}\right)^2} = 0,139.$$

$$l_{(x-c)} = \sqrt{\left(0,05 - \frac{0}{0,177}\right)^2 + \left(0,25 - \frac{0,032}{0,177}\right)^2 + \left(0,5 - \frac{0,0239}{0,177}\right)^2 + \left(1 - \frac{0,177}{0,177}\right)^2 + \left(0,12 - \frac{0,00046}{0,177}\right)^2}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\left| 1 - \frac{0,177}{0,177} \right| \right)^2 + \left(\left| 0,05 - \frac{0,00046}{0,177} \right| \right)^2 = 0,378 . \\
l_{(x-d)} & = \sqrt{\left(\left| 0,9 - \frac{0}{0,177} \right| \right)^2 + \left(\left| 1 - \frac{0,032}{0,177} \right| \right)^2 + \left(\left| 0,18 - \frac{0,0239}{0,177} \right| \right)^2 +} \\
& + \left(\left| 1 - \frac{0,177}{0,177} \right| \right)^2 + \left(\left| 0,3 - \frac{0,00046}{0,177} \right| \right)^2 = 1,233 .
\end{aligned}$$

Выполним расчет коэффициентов распознавания:

Для образа дефекта *a* рис. 3:

$$\xi_a = \frac{1}{\frac{(l_{(x-a)})^2}{(l_{(x-a)})^2 + (l_{(x-b)})^2 + (l_{(x-c)})^2 + (l_{(x-d)})^2}} = 0,029 .$$

Для образа дефекта *b* рис. 3:

$$\xi_b = \frac{1}{\frac{(l_{(x-b)})^2}{(l_{(x-a)})^2 + (l_{(x-b)})^2 + (l_{(x-c)})^2 + (l_{(x-d)})^2}} = 0,846 .$$

Для образа дефекта *c* рис. 3:

$$\xi_c = \frac{1}{\frac{(l_{(x-c)})^2}{(l_{(x-a)})^2 + (l_{(x-b)})^2 + (l_{(x-c)})^2 + (l_{(x-d)})^2}} = 0,114 .$$

Для образа дефекта *d* рис. 3:

$$\xi_d = \frac{1}{\frac{(l_{(x-d)})^2}{(l_{(x-a)})^2 + (l_{(x-b)})^2 + (l_{(x-c)})^2 + (l_{(x-d)})^2}} = 0,011 .$$

Сравнивая полученные значения коэффициентов распознавания, приходим к выводу, что при уровне распознавания 0,846, можно классифицировать дефект в трансформаторе "Постниково" Т-2, как высокотемпературный перегрев. При вскрытии данного трансформатора данный диагноз подтвердился. Зафиксирована "горячая точка" в сердечнике, перегрев меди из-за вихревых токов и плохих контактов, температура дефекта превысила 700 °С, повреждением затронута основная изоляция. Выполним аналогичные расчеты и, меняя значение меры

расстояния ν от 1 до 8, построим зависимость коэффициента распознавания от меры расстояния смотри рис. 4.

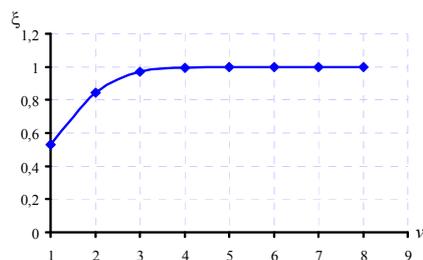


Рис. 4. Зависимость коэффициента распознавания ξ от значения меры диагностического расстояния для трансформатора Постниково Т-1, ТДТН-40/110/35/6.

Как видно из рисунка повышение меры расстояния более резко подчеркивает диагноз с наименьшим расстоянием. При этом полученная зависимость является нелинейной и имеет четко выраженную тенденцию к насыщению. Наиболее оптимальной мерой расстояния является кубическая мера, которая обеспечивает распознавание с достоверностью близкой к единице.

Выполненный анализ 75 трансформаторов, у которых в процессе эксплуатации были обнаружены дефекты, продемонстрировал высокую эффективность предложенной методики. Поставленный с ее помощью диагноз во всех случаях, полностью совпал с результатами вскрытия трансформаторов. При этом значения коэффициентов распознавания, при значении меры расстояния $\nu=3$, находились в пределах $\xi=0,968-0,994$, а зависимость коэффициента распознавания от меры диагностического расстояния, во всех случаях, имела тенденцию аналогичную рис. 4.

Однако, как и большинство рекомендованных в [1] критериев для интерпретации результатов ХАРГ, метод граничных значений приводит к неверному диагнозу в случаях, когда рост концентраций газов не связан с дефектом в трансформаторе. В этом легко убедиться на примере трансформатора ПС "Шахта-21" Т-2, "Луганскоблэнерго". Результаты хроматографического анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС "Шахта-21" Т-2", % об.

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
20.07.2007	0,0039	0,0094	0,00001	0,0353	0,0039	0,0257	0,1899

Как видно из табл. 2 наблюдается превышение граничных значений метаном, этиленом, этаном и водородом, что может быть интерпретировано как наличие дефекта. Критериальные отношения пар газов имеют следующие значения:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0,00028; \quad \frac{CH_4}{H_2} = 2,410; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 9,051,$$

что согласно п. 8.2.1 СОУ-НЕС 46.501:2006 можно интерпретировать как термический дефект с температурой более 700 °С;

Графический образ дефекта, построенный по результатам ХАРГ представлен на рис. 5.

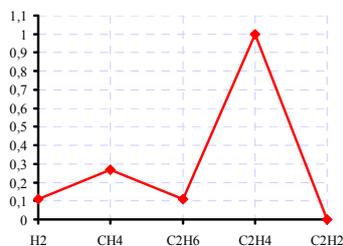


Рис. 5. Эксплуатационный образ дефекта в трансформаторе ПС "Шахта-21" Т-2".

Выполненный расчет коэффициентов распознавания по диагностическому расстоянию до эталонных образов, приведенных на рис. 3, при значении меры диагностического расстояния $\nu=3$, показал, что с достоверностью $\xi=0,984$ эксплуатационный образ соответствует эталонному образу, приведенному на рис. 3,б. Т.е. высокотемпературному нагреву. Однако причиной роста концентраций растворенных в масле газов оказался не дефект трансформатора, а нарушение контактных соединений на низкой стороне трансформатора Т-2, фаза А. Причем данное нарушение было обнаружено с помощью проведения тепловизионного анализа, термограмма данного дефекта приведена на рис. 6.



Рис. 6. Результаты тепловизионного контроля контактных соединений на стороне НН трансформатора ПС "Шахта-21" Т-2".

Таким образом, и критерий отношений пар газов и графический метод распознавания дефекта привели к неточной постановке диагноза, что могло привести к необоснованному выводу трансформатора из эксплуатации.

Несмотря на приведенный недостаток, графический метод, достаточно прост и эффективен при определении типа дефекта в трансформаторном оборудовании, что является его неоспоримым преимуществом.

Направление дальнейших исследований. Для снижения вероятности принятия ошибочных решений при использовании графического метода предлагается, выполнить оценку его диагностической ценности. Для чего провести анализ образов дефектов, полученных для бездефектных трансформаторов, у которых концентрации растворенных в масле газов превышают граничные значения. Подобная оценка позволит выявить возможные области применения графического метода, в которых будет достигнута максимальная достоверность распознавания, а также определить наиболее оптимальный набор методов статистической обработки, которые позволят снизить вероятность принятия ошибочного решения.

Выводы:

1. Предложена методика для автоматического распознавания образов возможных дефектов трансформаторов, основанная на методе эталонов;
2. Установлено, что повышение меры расстояния более резко подчеркивает диагноз с наименьшим расстоянием. При этом полученная зависимость является нелинейной и имеет четко выраженную тен-

денцию к насыщению;

3. Наиболее оптимальной мерой расстояния является кубическая мера, которая обеспечивает распознавание типа дефекта с достоверностью близкой к единице.

4. Выполненная проверка предложенной методики на 75 трансформаторах, у которых в процессе эксплуатации были обнаружены дефекты, продемонстрировал ее высокую эффективность;

Список литературы: 1. Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Київ. – 2007. – 92 с. 2. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00. – Офиц. изд. М.: НИЦ ЭНАС, 2001. – 28 с. – (Отраслевой руководящий документ действует с 01.01.2001). 3. IEEE Std C57.104, Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, 1991. 4. *Биргер И.А.* Техническая диагностика / *И.А. Биргер* – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.



Шутенко Олег Владимирович закончил электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1992 г. по специальности "Электроизоляционная, конденсаторная и кабельная техника". В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслonaполненного оборудования. В настоящее время работает доцентом кафедры "Передача электрической энергии", НТУ "ХПИ".



Баклай Дмитрий Николаевич закончил электроэнергетический факультет Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" в 2010 г. по специальности "Электрические системы и сети". Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслonaполненного оборудования. В настоящее время работает ассистентом кафедры "Передача электрической энергии", НТУ "ХПИ".



Острикова Татьяна Анатольевна магистр кафедры "Передача электрической энергии" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслonaполненного оборудования.

Поступила в редколлегию 05.10. 2012

УДК 621.314

Распознавание типа дефекта высоковольтных силовых трансформаторов на основе анализа образов дефектов, построенных по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов / Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 129-140. Бібліогр.: 4 назв.

Запропоновано методику для розпізнавання образів можливих дефектів трансформаторів за результатами хроматографічного аналізу розчинених в маслі газів, яка заснована на методі еталонів. Виконана перевірка запропонованої методики на 75 трансформаторах, у яких в процесі експлуатації були виявлені дефекти. Доведено високу ефективність запропонованої методики.

Ключові слова: дефекти трансформаторів, хроматографічний аналіз.

A technique for recognition of images of probable damages of transformers by results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil, based on a method of standards is proposed. Check of the proposed technique on 75 transformers in which damages have been while in service found out is executed. High efficiency of the proposed technique is proved.

Keywords: transformer damages, chromatographic analysis.

О.С. КРУГОВА, студентка, НТУ "ХПІ"

Ю.С. ГРИЩУК, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ"

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРООБІГРІВАЧІВ

Проведено огляд та аналіз і техніко-економічних характеристик електрообігрівачів. Встановлено співвідношення ціни та якості для цих приладів.

Ключові слова: електрообігрівачі, техніко-економічні характеристики, конструкцій.

Вступ. Обігрів побутових приміщень є однією з необхідних умов людського життя. Ще зовсім не давно в наших оселях встановлювали класичні каміни, які були здатні зігріти помешкання, особливо в холодну пору року. Сьогодні не кожен здатен встановити в своїй оселі камін, і тоді на допомогу приходять електричні опалювальні прилади. Серед яких можна виділити: електрокаміни, електрорадіатори, інфрачервоні (ІЧ) обігрівачі, електроконвектори.

Метою даної роботи є проведення огляду і аналізу існуючих конструкцій побутових електрообігрівачів та їх техніко-економічних характеристик.

Огляд і аналіз. *Електрокаміни* – найпоширеніші електроопалювальні прилади. Вітчизняна промисловість випускає біля тридцяти моделей цих приладів, що відрізняються один від одного зовнішнім виглядом і конструкцією, типом нагрівального елемента й формою відбивача, наявністю та числом щаблів регулювання потужності.

За призначенням електрокаміни можуть бути функціональними й декоративно-функціональними. Функціональні електрокаміни призначені тільки для обігріву приміщень, декоративно-функціональні поєднують у собі не зв'язані між собою функції обігріву й побутових меблів.

Декоративно-функціональні електрокаміни одночасно є елементом інтер'єра. Такі електрокаміни складаються з металевого або дерев'яного корпусу, покритого шпоною коштовних порід дерева, вузла імітації горіння дров і нагрівального блоку.

© Кругова О.С., Грищук Ю.С., 2012

Функціональним призначенням ІЧ-електрообігрівачів і їхнього різновиду електрокаміну є переважно променистий обігрів. У загальному випадку нагріте тіло випромінює енергію в широкому спектрі довжин хвиль, але для побутових електроопалювальних приладів в області температур нагрівача (до 900-1000 °С) переважає ІЧ-випромінювання з довжиною хвилі від 0,8 до 800 мкм, що при температурах нижче 400-500°С є практично єдиним видом випромінювання. Поряд з тепловим випромінюванням тут має місце й тепловіддача природною конвекцією, однак її частка стає менше вже при температурах нагрівача приблизно 100 °С і знижується з ростом цієї температури.

Конструкції електрокамінів розрізняють по виду нагрівального елемента (відкритий, закритий), формі відбивача (сферичний, циліндричний, параболічний, краплевидний, коритоподібний), формі світлового вікна (кругле, прямокутне), виконанню (підлоговий, настільний, настінний, універсальний), системі регулювання потужності, а також по додаткових пристроях (наприклад, імітація полум'я при горінні вугілля або дров і т.п.).

Конструкція ІЧ-електрообігрівачів. Залежно від температури нагрівача розрізняють два основних напрямки конструювання ІЧ-електрообігрівачів: з відбивачем і без нього.

Моделі з відбивачем функціонально й конструктивно близькі до електрокаміну і відрізняються від них меншою температурою нагрівача, що не регламентується. На включений стан звичайно вказує сигнальна лампа (одна або дві по числу щаблів). Помірні температури дозволяють застосовувати недефіцитні матеріали оболонки й наповнювача ТЕНу, а також спіралі в кераміку [1].

Електротепловентилятором називається двухцільовий електроприлад, що виконує функції вентилятора й нагріває повітря примусовою конвекцією [2].

Електротепловентилятори розрізняють по призначенню (стаціонарному й переносні), виконанню (настільні, підлогові, настінні, комбіновані), виду нагрівального елемента (відкритий, закритий), системам регулювання потужності нагрівача й продуктивності вентилятора, наявності терморегулятора й спеціальних пристроїв (аварійного вимикача, термообмежувачем, таймера, сигнальної лампи). У настільних та настінних електровентиляторах варто передбачати можливість нахилу струменя повітря у вертикальній площині в межах до 60°, хоча в першого типу цей кут, очевидно, може бути меншим.

Середній ресурс електровентилятора повинен бути не менш 3000 год. Змащення підшипників проводиться через інтервали не менш 500

год без розбирання приладу. Припустиме перевищення температури обмоток двигуна, а також електрична міцність його ізоляції щодо корпусу й між витками повинні відповідати стандарту. Надійність електровентилятора оцінюють імовірністю безвідмовної роботи, що за 1000 год наробітки повинна бути не менш 0,94 при довірчій імовірності 0,8. Гарантійний строк для вітчизняних електровентиляторів установлений в 1,5 року від дня продажу споживачеві [3].

Найбільше поширення електротепловентилятори мають у Західній Європі, де випускаються багатьма фірмами, особливо в Німеччині й Англії. Характерна потужність таких електротепловентиляторів 2 кВт. Сучасними моделями користуються також країни Східної Європи. Для внутрішнього ринку тут випускаються прилади меншої потужності. Всі моделі можуть працювати як із включенням нагрівачів, так і без них. При цьому прилад має не менш двох щаблів нагрівання. Для захисту від перегріву передбачається термообмежувач; повторне включення виробляється автоматично або вручну. Для більшості моделей характерна можливість зміни кута нахилу струменя повітря. Спеціалізовані фірми випускають серії з декількох моделей різної вартості, що відрізняються числом щаблів нагрівання й частотою обертання вентилятора, додатковими пристосуваннями й обробкою. Багато моделей мають терморегулятор для автоматичного підтримування температури в приміщенні (убудований або виносний) [4].

Електроконвектори. Функціональним призначенням електроконвектора є нагрівання навколишнього повітря шляхом природної конвекції. Подібні прилади доцільно використовувати в приміщеннях з достатньою теплоізоляцією (будинку капітальної будівлі, утеплені дерев'яні будинки і та ін.). Електроконвектори мають невелику масу й працюють безшумно й надійно, їх можна встановлювати в будь-якому місці приміщення. Для економії місця, а також при наявності в родині дітей доречні настінні моделі; для людей похилого віку зручні пересувні прилади на роликах. При стаціонарному опаленні максимальний комфорт забезпечується так званими плінтусними електроконвекторами, виконаними у вигляді довгих секцій невеликої потужності, установлюваних над плінтусом уздовж зовнішніх стін приміщення.

Промисловість випускає шість типів електроконвекторів. Всі вони оснащені клавішними перемикачами потужності. Електроконвектори випускаються потужністю 750, 1000 та 1250 Вт. Всі електроконвектори мають ідентичну конструкцію [5].

Електрокаміни-конвектори. Зміст комбінування електрокаміна й електроконвектора полягає в можливості використання даного прила-

ду як для загального конвективного, так і для місцевого обігріву випромінюванням. Крім того, з'являється можливість використання приладу відразу у двох режимах. Це зручно в більших холодних приміщеннях, де нагрівання повітря займає багато часу й споживач спочатку розташовується безпосередньо в зоні випромінювання [6].

Електрокаміни-тепловентилятори. Комбінування електрокаміна або ІЧ-обігрівача з електротепло-вентилятором за змістом аналогічно розглянутому вище сполученню променистого й конвективного обігріву в електрокамінах-конвекторах. Однак використання примусової конвекції дає тут додаткові переваги – посилений місцевий обігрів, у якому бере участь спрямований струмінь теплого повітря, і прискорене вирівнювання поля температур повітря. Як і електротепловентилятори, електрокаміни-тепловентилятори можна використовувати для сушіння волосся, білизни, мокрого взуття й таке інше, а також для вентиляції в літній період [7].

Порівняльний аналіз цін на електрообігрівачі приведено в табл. 1.

Таблиця – Порівняльний аналіз цін на електрообігрівачі

Тип електрообігрівача	Споживана потужність, кВт	Термін придатності	Технічна оцінка	Ціна, грн.
Електрокаміни	2-2,5	5-7	красивий на вигляд, обігріває приміщення не дуже гарно	750-18000
Електротепловентилятори	1,8-6	7-10 років	під час роботи створює шум, повільно нагріває приміщення	100-850
Електроконвектори	0,5-2,5	до 20 років	безшумний, простий в експлуатації, швидко нагріває приміщення	220-1500

Із таблиці видно, що ціни на побутові електрообігрівачі різні. Таким чином ці прилади доступні всім. Кожен має змогу вибрати ту ціну та якість за яку здатен заплатити. Але як показує досвід, чим дешевше електрообігрівач, тим менше він захищений, а значить становить небез-

пеку. Тому краще неекономити на безпеці свого життя та оточуючих.

Висновок. Розглянуті і проаналізовані особливості конструкцій електрокамінів, ІЧ-обігрівачів, електротепловентиляторів, електроконвекторів, електрокамінів-конвекторів, електрокамінів-тепловентиляторів та їх техніко-економічні характеристики, встановлено співвідношення ціни та якості для цих приладів.

Список літератури: 1. ГОСТ 16617-87 Электроприлади опалювальні побутові загальні технічні умови – Введ. 01.01.88. 2. ГОСТ 17083-87 Електротепловентилятори побутові. Загальні технічні умови – Введ. 01.01.89. 3. *Кривошейн І.А.* Побутові електронагрівальні прилади й установки. – М.: МКХ РСФСР. 4. *Муромський С.Н.* Особливості пристрою побутових нагрівальних електроприладів США. – М.: Информелектро, 1971. 5. ГОСТ 15047-78 Электроприлади нагрівальні побутові терміни й визначення – Введ. 05.12.78. 6. *Квятковський С.Ф., Волкова Л.В., Герчук Ю.М.* Побутові нагрівальні електроприлади. – М.: Энергоатомиздат, 1987. 7. *Шаровський О.В., Варшавський О.С.* Побутові електроопалювальні прилади. – М.: Енергія, 1975.

Поступила в редколегію 09.10.2012

УДК 681.58: 681.32

Огляд та аналіз конструкцій електрообігрівачів / Кругова О.С., Грищук Ю.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 141-145. Бібліогр.: 7 назв.

Проведен обзор и анализ и технико-экономических характеристик электрообогревателей. Установлено соотношение цены и качества для этих приборов.

Ключевые слова: электрообогреватели, технико-экономические характеристики, конструкции.

A review and analysis of the performance characteristics of electric heaters are presented. The correlation between price and quality for these devices is determined.

Keywords: electric heaters, performance characteristics, designs.

К.С. ПОЛУЛЯХ, к.т.н., проф., НТУ "ХПИ",
Л.А. МЕДВЕДЕВА, доц. НТУ "ХПИ"
И.И. ТОПОЛОВ, ст. преп. НТУ "ХПИ"

К АНАЛИЗУ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРУЮЩИХ АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ

В работе выполнен анализ метрологических характеристик помехозащищенных интегрирующих вольтметров, в которых используются в качестве входных устройств интегрирующие преобразователи частотного или временного типа. Так как свойства интегрирующих вольтметров полностью определяются видом входного устройства, сравнительный анализ характеристик вольтметров выполнен на основе исследования схем входных устройств.

Ключевые слова: метрологические характеристики, помехозащищенные интегрирующие вольтметры.

Введение. К цифровым вольтметрам, которые принято называть интегрирующими относятся вольтметры двойного интегрирования, которые содержат входной интегрирующий преобразователь измеряемого напряжения в длительность импульса и вольтметр частотного преобразования с входным интегрирующим преобразователем в частоту [1, 2].

Затем выходные параметры интегрирующих преобразователей: частота и временной промежуток квантуются точно так, как это происходит в частотомерах или хронометрах.

Следовательно, интегрирующий вольтметр содержит два преобразователя: входной аналоговый интегрирующий преобразователь измеряемого напряжения в частоту или длительность импульса и квантовый преобразователь [1, 3].

Такие свойства интегрирующих вольтметров, как получение результата измерения пропорционального среднему значению измеряемого напряжения и возможность осуществления помехозащищенности реализуются входным интегрирующим аналоговым преобразователем, работа которого не связана с цифровым преобразованием.

Следовательно, сравнительный анализ метрологических характеристик вольтметров частотного и временного преобразования может быть выполнен на основе исследования свойств входных интегрирующих аналоговых преобразователей.

© Полулях К.С., Медведева Л.А., Тополов И.И., 2012

Общая характеристика интегрирующих вольтметров. В вольтметрах двойного интегрирования (ДИ) используются преобразователи напряжения в длительность импульса. Преобразователи напряжения в частоту применяются в вольтметрах частотного преобразования (ЧП).

При построении помехозащищенных интегрирующих вольтметров обычно используется процесс двухтактного интегрирования определенной последовательности измеряемого и образцового напряжений, называемый циклом [1]. Процесс, проходящий в течение цикла описывается уравнениями, которые используются для определения измеряемого напряжения через известное образцовое.

В течение выполнения цикла интегрирования происходит сравнение двух напряжений, зависящих соответственно от измеряемого и образцового параметров, что характерно для большинства измерительных устройств.

Отличие интегрирующих приборов, например, от компенсаторов или мостов, которые работают в статических режимах, состоит в том, что компенсация осуществляется в динамике, когда каждому этапу процесса измерения отводится строго определенный отрезок времени.

В процессе измерения в первом такте цикла интегрирования выполняется интегрирование входного напряжения u в течение некоторого постоянного времени $t_{инт}$. Результат интегрирования определяется вольтсекундной площадью $S = U_{ex1} \cdot t_{инт}$, пропорциональной приращению выходного напряжения интегратора.

Процесс преобразования, выполняемый интегратором, в общем случае характеризуется уравнением:

$$U_{вых}(t) = - \int_0^t \frac{U_{ex} dt}{RC} = - \frac{U_{excp} t}{RC} = - \frac{S}{RC}; \quad (1)$$

где $U_{excp} = - \int_0^t U_{ex} dt$ – среднее значение напряжения $U_{ex}(t)$ за время t ,

$U_{вых}(t)$ – функция выходного напряжения интегратора $U_{вых}$.

На рис. 1 и 2 показаны схемы интеграторов, а также временные графики напряжений $U_{ex}(t)$ и $U_{вых}(t)$ для вольтметров ДИ и ЧП.

Во втором такте проходит процесс обратного интегрирования входного напряжения U_{ex2} противоположной полярности до момента, когда приращение выходного напряжения уменьшится до исходного значения. Полученная во втором такте отрицательная вольтсекундная площадь – S_2

по абсолютной величине будет равна S_1 . Напряжения U_{ax1} и U_{ax2} состоят из измеряемого U_x и образцового E_0 напряжений. Поэтому используя уравнение $S_1 - S_2 = 0$ можно определить U_x через известное образцовое напряжение E_0 .

Следовательно, суммарная вольтсекундная площадь за цикл интегрирования, состоящий из прямого и обратного тактов, будет равна нулю.

Помехозащищенность интегрирующих приборов основана на выборе величины времени интегрирования измеряемого напряжения U_x , равного или кратного периоду помехи. Тогда вольтсекундная площадь напряжения помехи за время интегрирования U_x , будет равна нулю, поэтому не будет оказывать влияния на результат измерения.

В дальнейшем в качестве конкретного примера будем считать, что помеху создает сетевое напряжение, имеющие период $T_c = 1/50$ с, поэтому время интегрирования измеряемого напряжения U_x выбираем равным T_c :

$$t_{инт} = T_c. \quad (2)$$

График напряжения помехи показан на рис. 1,а.

Исходные данные для сравнения ДИ и ЧП. Сделаем расчеты параметров вольтметров ДИ и ЧП, на основании которых выполним сравнительный анализ величин параметров указанных вольтметров.

Как показано на графиках (рис. 1,а и 2,а) при одинаковом времени интегрирования напряжения U_x , равном $t_{инт} = T_c$, за время интегрирования U_x в вольтметре ДИ пройдет один цикл интегрирования, состоящий из прямого и обратного тактов. В вольтметре ЧП за это же время пройдет число двухтактных циклов равное количеству шагов квантования.

Для справедливого сравнительного анализа характеристик вольтметров необходимо выбрать равные условия с точки зрения характеристик приборов по точности измерения, уровню помехозащищенности, частотным показателям, номинальному значению измеряемого напряжения и другим параметрам.

Выберем исходный режим, соответствующий измерению номинального значения напряжения $U_x = U_{хи}$. В этом режиме параметры вольтметров наиболее близки, при уменьшении напряжения U_x сходство параметров уменьшается. Графически режимы работы вольтмет-

ров при $U_x = U_{xH}$ показаны на рис. 1,а и 2,а.

В качестве одинаковых параметров вольтметров ДИ и ЧП выберем следующие:

1. Номинальное значение измеряемых напряжений U_{xH} .

2. Значение номинального выходного напряжения интегратора $U_{выхH}$ выберем равным напряжению U_{xH} :

$$-U_{xH} = U_{выхH}. \quad (3)$$

Указанные параметры связаны уравнением (1).

3. Для обеспечения одинаковой точности обоих вольтметров примем одинаковые значения номинального числа шагов квантования N_{xH} .

4. Для получения близких частотных режимов номинальную частоту f_{xH} выходного напряжения интегратора вольтметра ЧП при $U_x = U_{xH}$ будем считать равной частоте квантующего напряжения $f_{кв}$ вольтметра ДИ.

5. Чтобы создать равные условия помехозащищенности примем одинаковую длительность интегрирования измеряемого напряжения $t_{инт} = T_c$.

При выбранных условиях найдем некоторые численные соотношения между параметрами приборов. Введем обозначения: $\Delta t = 1/f_{кв}$ – шаг квантования временного отрезка t_x , пропорционального измеряемому напряжению в вольтметре ДИ, равный периоду квантующей частоты:

$$\Delta t = \frac{t_{xH}}{N_{xH}} \quad (4)$$

$T_{xH} = 1/f_{xH}$ – период выходной частоты f_{xH} интегратора при измерении номинального значения напряжения U_{xH} :

$$T_{xH} = \frac{T_c}{N_{xH}}. \quad (5)$$

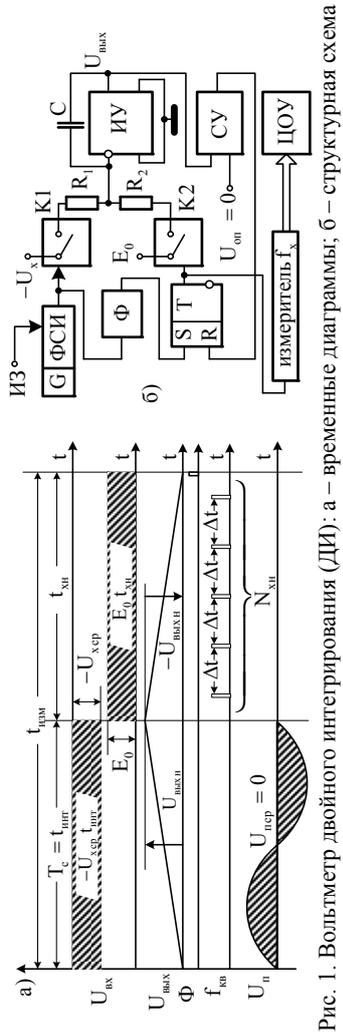


Рис. 1. Вольтметр двойного интегрирования (ДИ): а – временные диаграммы; б – структурная схема

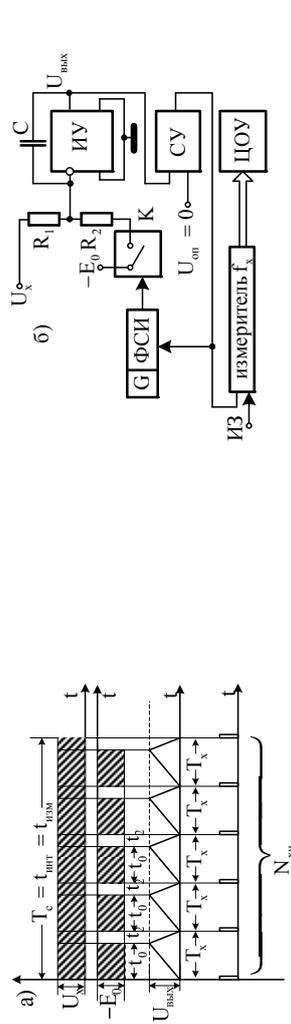


Рис. 2. Вольтметр частотного преобразования (ЧП): а – временные диаграммы; б – структурная схема.

Так как $f_{xH} = f_{KB}$ приравняем периоды Δt и T_{xH} определяемые уравнениями (4) и (5):

$$\Delta t = \frac{t_{xH}}{N_{xH}} = T_{xH} = \frac{T_c}{N_{xH}}. \quad (6)$$

Последовательно найдем уравнения определяющие характеристики вольтметров ДИ и ЧП.

Основные уравнения вольтметра ДИ. Представим уравнение интегрирования напряжений в двух тактах вольтметра ДИ. Процесс интегрирования в каждом такте соответствует уравнению (1). Уравнения составлены на основании графиков данных на рис. 1,а. Результаты расчетов внесены в таблицу. Временные параметры выражены через период помехи T_c , равный времени интегрирования $t_{инт}$ измеряемого напряжения U_x .

Параметры, имеющие размерность напряжения определены через U_{xH} .

Определим временные характеристики вольтметра ДИ. За время измерения, $t_{изм}$ как следует из рис. 1,а, проходит один цикл интегрирования:

$$N_{ц} = 1 \quad (7)$$

Цикл интегрирования состоит из двух тактов: прямого и обратного интегрирования продолжительностью соответственно $t_{xH} = T_c$ и t_x как следует из (6).

Длительность цикла интегрирования равна времени измерения

$$t_{изм} = T_c + t_x.$$

Значение t_x можно найти используя пропорциональные отношения:

$$\frac{t_x}{t_{xH}} = \frac{U_x}{U_{xH}} = \frac{t_x}{T_c} = \frac{N_x}{N_{xH}} \quad (8)$$

Откуда получим значение t_x :

$$t_x = T_c \frac{N_x}{N_{xH}} \quad (9)$$

Таблица – Основные уравнения вольтметров ДИ и ЧП

Наименование параметров	Уравнения вольтметра ДИ и номера формул		Уравнения вольтметра ЧП и номера формул	
Количество циклов за время измерения	1	7	N_x	29
Длительность цикла t_u	$t_u = T_c \left(1 + \frac{N_x}{N_{xH}} \right)$	10	$t_u = \frac{T_c}{N_x}$	29
Длительность прямого такта	T_c	11	$t_0 = T_{xH} \cdot \frac{T_c}{N_x} \cdot A$	29
Входное напряжение прямого такта	$-U_x$	11	$-(E_0 - U_x)$	22
Вольтсекундная площадь S_1 прямого такта	$-S_1 = -U_x \cdot T_c$	11	$-S_1 = -(E_0 - U_x) \cdot t_0$	22
Длительность обратного такта	$t_x = T_c \cdot \frac{N_x}{N_{xH}}$	9	$t_2 = \frac{T_c}{N_x} - \frac{T_c}{N_{xH}} A$	31
Входное напряжение обратного такта	E_0	12	U_x	23
Вольтсекундная площадь S_2 обратного такта	$S_2 = E_0 \cdot T_c \cdot \frac{N_x}{N_{xH}}$	12	$S_2 = U_x \cdot (T_x - t_0)$	23
Уравнение измерения	$U_x = \frac{E_0 \cdot \Delta t \cdot N_x}{T_c}$	13	$U_x = \frac{E_0 \cdot t_0 \cdot N_x}{T_c}$	25
Время измерения	$t_{изм} = T_c \left(1 + \frac{N_x}{N_{xH}} \right)$	10	$t_{изм} = T_c$	21
Длительность периодов счетных импульсов	$\Delta t = \frac{T_c}{N_{xH}}$	4	$T_x = \frac{T_c}{N_x}$	26
Отношение $A = \frac{U_{xH}}{E_0}$	$A = \frac{U_{xH}}{E_0} = 1$	16	$A = \frac{t_0}{T_{xH}} = \frac{U_{xH}}{E_0} < 1$	28
Шаг квантования ΔU	$\Delta U = \frac{U_{xH}}{N_{xH}}$	19	$\Delta U = \frac{U_{xH}}{N_{xH}}$	33
Постоянная времени RC	$RC = T_c$	20	$RC = \frac{T_c}{N_{xH}} (1 - A)$	34

Следовательно:

$$t_{изм} = T_c + t_{хн} \frac{U_x}{U_{хн}} = T_c \left(1 + \frac{N_x}{N_{хн}} \right) \quad (10)$$

Определим уравнения измерения вольтметра ДИ.

$$U_{вых} = -\frac{U_x \cdot T_c}{RC} = -\frac{S_1}{RC}; \quad (11)$$

$$-U_{вых} = \frac{E_0 \cdot t_x}{RC} = \frac{S_2}{RC}; \quad (12)$$

где $-S_1 = -U_x \cdot T_c$ и $S_2 = E_0 \cdot t_x$ соответственно вольтсекундные площади, относящиеся к прямому и обратному тактам; E_0 – образцовое напряжение.

Сложив уравнения (11) и (12) получим:

$$S_2 - S_1 = E_0 \cdot t_x - U_x \cdot T_c = 0$$

Откуда найдем уравнение измерения:

$$U_x = \frac{E_0 \cdot t_x}{T_c} = \frac{E_0 \cdot \Delta t \cdot N_x}{T_c} \quad (13)$$

Преобразование (13) выполнено на основании следующего уравнения:

$$t_x = \Delta t \cdot N_x \quad (14)$$

Определим уравнение измерения из (13) при номинальном значении напряжения $U_x = U_{хн}$:

$$U_{хн} = \frac{E_0 \cdot t_{хн}}{T_c} = \frac{E_0 \cdot \Delta t \cdot N_{хн}}{T_c} \quad (15)$$

Введем обозначение $A = U_{хн} / E_0$. Определим значение A , подставив в (15) величину $T_c = t_{хн}$ из (6):

$$\frac{U_{хн}}{E_0} = A = 1 \quad (16)$$

Для определения шага квантования ΔU представим уравнение измерения в общем виде:

$$U_{хн} = \Delta U \cdot N_{хн} \quad (17)$$

Сопоставив уравнения (15) и (17), можно сделать следующий вывод:

$$\Delta U = \frac{E_0 \cdot \Delta t}{T_c} \quad (18)$$

Подставив в (18) величины $T_c = \Delta t \cdot N_{xH}$ и $E_0 = U_{xH}$, найденные соответственно из уравнений (6) и (16), определим значение шага квантования ΔU измеряемого напряжения U_x :

$$\Delta U = \frac{U_{xH}}{N_{xH}} \quad (19)$$

Постоянную времени RC найдем из уравнения (11) или (12), подставив полученные соответственно из (3) и (16) значения $U_{выхH} = U_{xH}$ и $E_0 = U_{xH}/A$:

$$RC = T_c \quad (20)$$

Основные уравнения вольтметра ЧП. Таким же путем определим аналогичные параметры вольтметра ЧП. В соответствии с графиком, данным на рис. 2,а, найдем время измерения $t_{изм}$ согласно (6):

$$t_{изм} = t_{инт} = T_c \quad (21)$$

Длительность цикла интегрирования равна периоду частоты f_x , значение которого составляет величину T_x .

Продолжительности прямого и обратного тактов выражаются величинами соответственно t_0 и $T_x - t_0$.

Определим уравнения для интегратора в соответствии с выражением (1):

$$U_{вых} = -\frac{(E_0 - U_x) \cdot t_0}{RC} = -\frac{S_1}{RC}; \quad (22)$$

$$-U_{вых} = -\frac{U_x \cdot (T_x - t_0)}{RC} = \frac{S_2}{RC}; \quad (23)$$

где $-S_1 = -(E_0 - U_x) \cdot t_0$ и $S_2 = U_x \cdot (T_x - t_0)$ – вольтсекундные площади, соответствующие прямому и обратному тактам.

Сложив уравнения (22) и (23) получим:

$$S_2 - S_1 = U_x \cdot (T_x - t_0) - (E_0 - U_x) \cdot t_0 \quad (24)$$

Откуда найдем уравнение измерения:

$$U_{xH} = \frac{E_0 \cdot t_0}{T_x} = \frac{E_0 \cdot t_0 \cdot N_x}{T_c} \quad (25)$$

Преобразование (25) выполнено на основе уравнения:

$$T_x = \frac{T_c}{N_x}. \quad (26)$$

Определим уравнение измерения из (25) при номинальном значе-

нии напряжения $U_x = U_{xн}$:

$$U_{xн} = \frac{E_0 \cdot t_0}{T_{xн}} = \frac{E_0 \cdot t_0 \cdot N_{xн}}{T_c} \quad (27)$$

Введем обозначение $A = \frac{U_{xн}}{E_0}$. Определим значение A из уравнения (27):

$$\frac{U_{xн}}{E_0} = \frac{t_0}{T_{xн}} = \frac{t_0 \cdot N_{xн}}{T_c} = A < 1 \quad (28)$$

Неравенство $A < 1$ вытекает из того положения, что как видно из графика на рис. 2,а, длительность прямого такта t_0 всегда меньше продолжительности цикла, которая при $U_{xн}$ равна $T_{xн}$.

Определим параметры циклов интегрирования вольтметра ЧП.

За время измерения T_c проходит число циклов, равное числу ступеней квантования N_x . Следовательно, длительность цикла интегрирования t_u будет:

$$t_u = \frac{T_c}{N_x} = T_x; \quad (29)$$

где T_x – период повторения счетных импульсов, число которых за время измерения равно N_x .

Длительность прямого такта интегрирования в каждом цикле имеет значение t_0 , величину которого можно определить из (28):

$$t_0 = \frac{A \cdot T_c}{N_{xн}} = T_{xн} \cdot A. \quad (30)$$

Длительность t_0 – величина постоянная $t_0 = const$.

Продолжительность обратного такта t_2 определится из уравнения $t_u = t_0 + t_2$, следовательно:

$$t_2 = t_u - t_0 = T_x - t_0 = \frac{T_c}{N_x} - \frac{T_c \cdot A}{N_{xн}}. \quad (31)$$

Для определения шага квантования воспользуемся уравнением измерения в общем виде, представленном в (17).

Сопоставив уравнения (12) и (19), можно сделать следующий вывод:

$$\Delta U = \frac{E_0 \cdot t_0}{T_c}. \quad (32)$$

Подставив в (32) значения $E_0 = N_{xH}/A$ и $t_0 = T_{xH} \cdot A$ из (28) и $T_c = T_{xH} \cdot N_{xH}$ из (6) определим значения шага квантования ΔU измеряемого напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_{xH}}{N_{xH}} \quad (33)$$

Значение постоянной времени RC найдем из уравнения (22) или (23), подставив полученную из (3) величину $U_{выхH} = -U_{xH}$, значение рассчитанных из (28) параметров $E_0 = U_{xH}/A$ и $t_0 = AT_c/N_{xH}$, а также номинальную величину периода $T_{xH} = T_c/N_{xH}$, найденную из (6). В результате получим:

$$RC = \frac{T_c}{N_{xH}}(1 - A) \quad (34)$$

Полученные уравнения параметров и их номера даны в таблице.

Порядок расчета параметров помехозащищенного интегрирующего вольтметра двойного интегрирования.

1. Длительность импульса на выходе формирователя строб импульса (ФСИ).

Как показано на схеме и графике рисунка 1 в прямом такте цикла интегрирования на выходе ФСИ возникает импульс постоянной длительности, управляющий продолжительностью процесса интегрирования. Длительность импульса, как показано в таблице, определяется уравнением (11) и равна T_c .

2. Значение образцового напряжения E_0 .

Согласно (16) величина образцового напряжения E_0 определяется уравнением:

$$E_0 = \frac{N_{xH}}{A};$$

где $A = 1$

3. Расчет значения квантующей частоты.

Квантующая частота определяется уравнением:

$$f_k = \frac{N_{xH}}{T_c}.$$

4. Постоянная времени RC .

Значение постоянной времени определяется уравнением (20):

$$RC = T_c.$$

При расчете задают один из параметров R или C и определяют второй.

5. Время измерения $t_{изм}$.

Длительность времени измерения зависит от измеряемой величины U_x и определяется уравнением (10):

$$t_{изм} = T_c \left(1 + \frac{N_x}{N_{хн}} \right).$$

Время измерения равно длительности цикла, состоящего из двух тактов.

Порядок расчета параметров помехозащищенного интегрирующего вольтметра частотного преобразования.

Сравнительные данные расчета вольтметров ДИ и ЧП таны в таблице.

1. Длительность импульса на выходе формирователя стробимпульсов.

Как показано на схеме и графике рисунка 2 в прямом такте цикла интегрирования на выходе ФСИ возникает импульс постоянной длительности, управляющий продолжительностью процесса интегрирования. Длительность импульса определяется уравнением (29) и равна:

$$t_0 = T_{хн} \cdot A = \frac{T_c}{N_{хн}} \cdot A.$$

2. Значение образцового напряжения E_0 .

Согласно уравнению (28) величина образцового определяется уравнением:

$$\frac{U_{хн}}{E_0} = \frac{t_0}{T_{хн}} = A < 1.$$

Значение A выбирается с соблюдением приведенного условия.

3. Расчет значения выходной частоты интегратора.

Выходная частота интегратора зависит от измеряемого напряжения и определяется уравнением:

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{N_x}{T_c}.$$

4. Постоянная времени RC .

Значение постоянной времени вычисляется из уравнения (34):

$$RC = f_x = \frac{T_c}{N_{хн}} (1 - A).$$

При расчете задается один из параметров R или C и определяют

второй.

5. Время измерения $t_{изм}$.

Время $t_{изм}$ согласно (21) определяется уравнением:

$$t_{изм} = T_c$$

Вывод: При выборе типа вольтметра для решения определенной задачи следует принимать во внимание, что максимальное время измерения вольтметра ДИ в 2 раза больше чем в вольтметре ЧП.

Постоянная времени в вольтметре ЧП почти в $N_{хн}$ раз меньше чем при двойном интегрировании, что может затруднить реализацию RC из-за малых значений параметров R и C .

Анализ показывает, что в вольтметрах ДИ и ЧП отличаются по величине такие параметры: $t_{изм}$, E_0 , RC , длительности импульсов на выходе формирователей строб-импульсов.

Период квантующих импульсов Δt вольтметра ДИ равен длительности прямого такта интегрирования t_0 вольтметра ЧП:

$$\Delta t = t_0 = const$$

Результат измерения пропорционален среднему значению измеряемого напряжения за время $t_{инт} = T_c$.

Следует отметить различие режимов работы частотных и временных входных преобразователей.

Частотный преобразователь работает непрерывно, а измерение происходит после импульса запуска (ИЗ) измерителя f_x (рис. 2,б).

При использовании временного преобразователя после импульса запуска одновременно начинает работать преобразователь и измеритель длительности импульса, процесс повторяется после следующего импульса запуска (рис. 1,б).

Список литературы: 1. В.С. Гутников Интегральная электроника в измерительных устройствах, Ленинград, Атомиздат. – 1988. – С. 305. 2. Е.М. Душин Основы метрологии и электрические измерения, Ленинград, Атомиздат. – 1987. – С. 479. 3. В.М. Чинков. Цифрові вимірювальні прилади, Харків, НТУ "ХПІ". – 2008. – С. 507.

Поступила в редколлегию 03.06.12

УДК 621.317.725.083.92

К анализу метрологических характеристик интегрирующих аналоговых преобразователей цифровых вольтметров / Полулях К.С., Медведева Л.А., Тополов И.И. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення

електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 146-159. Бібліогр.: 3 назв.

В роботі виконано аналіз метрологічних характеристик заводозахищених інтегровальних вольтметрів, в яких використовуються в якості вхідних пристроїв інтегровальні перетворювачі частотного або часового типу. Оскільки властивості інтегровальних вольтметрів повністю визначаються видом вхідного пристрою, порівнювальний аналіз характеристик вольтметрів виконаний на основі дослідження схем вхідних пристроїв.

Ключові слова: метрологічні характеристики, перешкодозахищеність інтегруючі вольтметри.

In this paper we analyzed the metrological characteristics of interference-tolerant integrating voltmeters, in which integrating transducers of frequency or time type as input devices are used. Since the properties of integrating voltmeters are completely determined by the type of the input device, a comparative analysis of the characteristics of voltmeters based on the investigation of schemes of input devices is carried out.

Keywords: metrological characteristics, interference immunity, integrating voltmeters.

Р.Я. ПРОТОПОПОВ, аспирант, НТУ "ХПИ"

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

В.П. ШАПОРЕВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В РЕАКТОРАХ
ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ В ПРОИЗВОДСТВАХ
ТЕХНИЧЕСКОЙ БУМАГИ**

Проведен теоретический анализ взаимодействия закрученных горячих потоков в реакторах различного типа. Получены модели и уравнения для расчета поля скоростей, пути смещения, а также энергетического распределения тепловых потоков и средних температур.

Ключевые слова: реакторы, закрученные горячие потоки, модели расчета.

Введение. Для термического обезвреживания парогазовой смеси, образующейся при производстве технической бумаги, на многих фабриках используются циклонные топки вертикального и горизонтального типов. Парогазовая смесь содержит вредные вещества в виде органических соединений типа: полициклических ароматических углеводородов, углеводородов C_3-C_{20} , углеводородов, которые содержат хлор и других. Концентрация вредных веществ в парогазовой смеси в среднем составляет 3-4 г/нм³. Работа имеющихся стендовых и полупромышленных технологических циклов (циклонных топок) на газе в технической литературе практически не освещена. Тем не менее, можно сформулировать основные требования к рациональной системе отопления циклонов газом, которые заключаются в следующем [1, 2]

1. В циклоне должен быть создан наиболее короткий факел, обеспечивающий достаточно высокую температуру в головной его части, где для этого должна сгорать основная масса топлива. В этом случае обеспечиваются наилучшие условия теплообмена газов.

2. Наиболее короткий высокотемпературный факел может быть получен при применении горелочных устройств с полным внутренним смещением газа и воздуха.

3. Типовые горелки полного внутреннего смещения (инжекционные одно- и двухпроводные для отопления циклонов, работающих на горячем воздухе и при переменном противодавлении в камере не пригодны).

© Протопопов Р.Я., Себко В.В., Шапоров В.П., 2012

4. При отоплении небольших промышленных циклонов (расход газа 1000-1500 $\text{м}^3/\text{час}$), рекомендуется на циклоне установить 4-6 тангенциальных газовых горелок с укороченными смесителями, при отоплении же более мощных циклонов целесообразно применять горелки с периферийной подачей газа в воздушные патрубки со сравнительно короткими смесителями.

Конструкции газовых горелок приведены на рис. 1, 2. На рис. 3 приведена принципиальная схема циклонной топki.

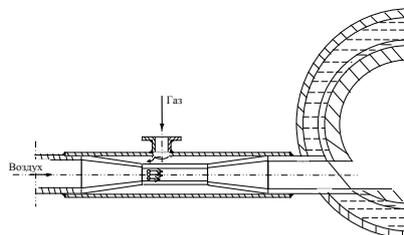


Рис. 1. Схема газовых горелок станdовых установок.

Как видно из приведенных схем на рис. 1-3 подаваемая в циклонную камеру парогазовая смесь движется предположительно вдоль оси циклона в виде закрученного потока, а топочные газы тоже движутся в виде закрученного потока по периферии. В начале движения потоки ПГС и топочных газов имеют "индивидуальные" структуры потоков и значения температур, а затем, двигаясь вдоль оси, происходит турбулентное смешение потоков и в каком-то сечении циклона устанавливается единая усредненная температура потока с характерным значением на выходе из циклона.

Как правило, [1, 2] организация движения потоков в технологическом циклоне (рис. 3) представляется в виде противоположно коаксиально закрученных потоков и от их взаимодействия между собой определяется характерное значение температуры на выходе из циклона и длина зоны полного смешения, при которой достигается характерное значение температуры общего газового потока.

Следует отметить, что аналогичная характеристика движения потоков наблюдается и на установках термического обезвреживания ПГС горизонтального типа [3, 4] (рис. 4), для которых также важно определение длины зоны полного смешивания газов потоков и температурных режимов по длине реактора, что должно обеспечиваться рациональной системой отопления горизонтальных реакторов по типу технических циклонов (пункты 1-4). Несмотря на ряд известных почти

классических работ [5-8], в которых описаны математические модели взаимодействия потоков с аналогичными характеристиками, остаются не исследованы вопросы, касающиеся создания расчётных моделей для определения основных параметров в рабочей полости реакторов.

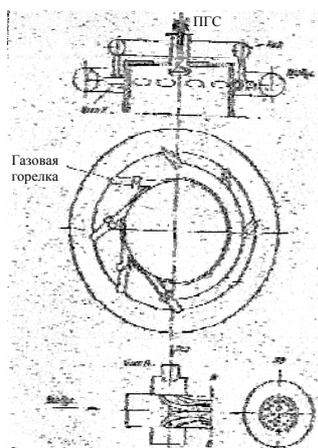


Рис. 2. Схема отопления газового циклона большой мощности.

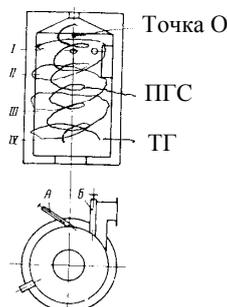


Рис. 3. Циклонная камера:
I-IV – сечения; А – первый способ
ввода топлива; Б – второй способ
ввода топлива.

В связи с изложенным выше, **основной целью** настоящей работы является создание расчётных моделей и экспериментальное подтверждение основных положений модели процессов.

Теоретическое обоснование движения потоков в цилиндрической системе координат. Очевидно, что режим движения (течения) газового потока в реакторах (рис. 3, 4) турбулентный, а рабочая среда – вязкий сжимаемый газ. Движение газа в рабочей полости аппарата представляется как результат сложения двух течений. Считаем, что закрутку газового потока, которая образуется при вводе топлива через сопла (форсунки) в циклоне и в горизонтальном аппарате при вводе ПГС можно имитировать как вращающийся жидкий диск пронизываемый для парогазовой смеси. Тангенциальные скорости этого жидкого диска по радиусу имеют такой же закон изменения, как и в сечении цилиндра при поступлении в печь рабочей смеси или факела топочных газов в горизонтальном аппарате через сопла или завихрители. В этом случае образуется течение вязкого турбулентного потока относительно вращающегося диска.

По мере удаления от диска тангенциальные составляющие скорости движения газового потока будут резко уменьшаться и в каждом

последующем сечении радиальный градиент давления будет убывать, в результате чего возникает осевой градиент давления, являющийся причиной возникновения направленных потоков к диску. Вследствие действия закона неразрывности массы, появляются радиальные токи, и между каждыми двумя соседними дисками образуется торообразный вихрь (вихрь Хилла [9]). Причём, тангенциальные составляющие скорости объёмов газов, движутся к центру и периферии, будут устанавливаться по радиусу произвольно.

Турбулентное течение вязкой среды у вращающегося диска вызывает перестройку потока и обеспечивает газодинамическую ситуацию энергетического разделения в соответствии с гипотезой профессора Меркулова А.П. [10], но не даёт расходных скоростей, реализующихся в действительности. При создании расчётной математической модели для определения поля скоростей в рабочей полости реакторов учитывались известные экспериментальные данные о формировании потоков в реакторах, а также предполагаемые условия той аэродинамической ситуации, которая приводит к появлению эффекта РАНКА [11].

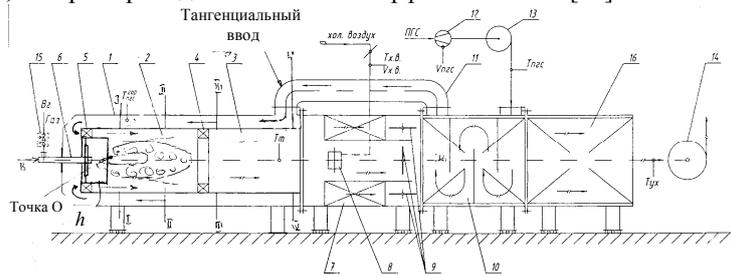


Рис. 4. Установка термического обезвреживания ПГС.

Обозначения на рис. 4: 1 – печь термического обезвреживания; 2 – топка печи – камерная; 3 – камера догорания; 4 – антизавихритель; 5 – завихритель; 6 – горелка газовая; 7 – термомасляный подогреватель; 8 – канал подмешивания холодного воздуха; 9 – шиберы регулирования температуры термомасла; 10 – подогреватель парогазовой смеси (ПГС) – воздухоподогреватель; 11 – воздуховод подачи ПГС на печь; 12 – узел учёта расхода ПГС; 13 – вентилятор ПГС; 14 – дымосос; 15 – двойной магнитный клапан отсекающий; 16 – водяной экономайзер; $T_{х.в.}$ – температура холодного воздуха; $T_{пгс}$ – температура ПГС на входе в установку; T – температура ПГС после воздухоподогревателя перед газовой горелкой; T_t – температура газов на выходе из топки печи; $T_{ух}$ – температура уходящих газов; $V_{пгс}$ – объём ПГС на входе в

установку; $V_{х.в.}$ – объем холодного воздуха; $B_{г}$ – расход природного газа; B – воздух; \dashrightarrow Продукты сгорания и обезвреживания; \rightarrow ПГС; I-IV – сечения участков топочной камеры.

Поместим начало цилиндрической системы координат (r, ε, z) в точку ноль (0), находящуюся на центральной оси аппарата (рис. 3, 4). Вихревое стационарное турбулентное течение несжимающейся вязкой среды в виде диска описывается уравнением движения в форме Рейнольдса, которое в проекциях на координатные оси имеет вид [12-14]:

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} W - \frac{v^2}{r} \right) = \frac{\partial P}{\partial r} + \\ & + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-\rho \bar{r} u' u') + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (-\rho \bar{u}' v') - \frac{1}{r} (-\rho \bar{v}'^2) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \bar{u}' w'); \quad (1) \\ & \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \varepsilon} + W \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varepsilon} + \\ & + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{v}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varepsilon} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial r} (-\rho \bar{v}' u') + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (-\rho \bar{v}'^2) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \bar{v}' w') + \frac{2}{r} (-\rho \bar{v}' u'); \quad (2) \\ & \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \varepsilon} + W \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varepsilon^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-\rho r \bar{u}' w') + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (-\rho \bar{v}' w') + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \bar{w}'^2). \quad (3) \end{aligned}$$

Воспользуемся полуэмпирической теорией "пути смещения" Пандтля для связи тензора турбулентных напряжений с осреднёнными значениями скоростей [15, 16]. Тогда

$$\left. \begin{aligned} -\rho \bar{u}'^2 &= 2A \frac{\partial u}{\partial r}; & -\rho \bar{u}' v' &= A \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial w}{\partial z} \right); \\ -\rho \bar{v}'^2 &= 2A \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varepsilon} - \frac{u}{r} \right); & -\rho \bar{u}' w' &= A \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right); \\ -\rho \bar{w}'^2 &= 2A \frac{\partial w}{\partial z}; & -\rho \bar{v}' w' &= A \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varepsilon} \right); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где r, ε, z – координаты цилиндрической системы; u, v, w – радиальная, тангенциальная и аксиальная скорости на координатные оси, соответственно, м/с; P – давление несущей среды, Па; ρ – плотность несущей среды, кг/м³; ω – угловая скорость вращения потока на выходе из завихрителя ПГС и/или из сопел топочных газов в циклоне рад/с, A – коэффициент турбулентной вязкости.

Уравнение неразрывности массы имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Учитывая то, что коэффициент турбулентной вязкости является линейной радиуса (увеличивается от центра аппарата к периферии функцией), решаем систему уравнений (1)-(5) при следующих граничных условиях:

$$u = 0; \quad v = \omega(r)r; \quad w = 0; \quad P = P_0 \quad \text{при } z = 0. \quad (6)$$

$$u = 0; \quad v = 0; \quad w = \text{const}; \quad P = \text{const} \quad \text{при } z \rightarrow \infty. \quad (7)$$

Система уравнений (1)-(5) решена численно на ЭВМ методом конечных разностей с заменой первых производных левыми разностями, а вторых – центральными. Полученная система уравнений относительно значений искомых функций в узлах сеток решалась методом поординатного спуска. Цифровой материал обработан таким образом, что компоненты скорости течения диска могут быть определены в любой точке реактора в соответствии с выражениями:

$$u_1 = r\omega F(z); \quad (8)$$

$$v_1 = r\omega G(z); \quad (9)$$

$$w = \sqrt{D\omega \cdot H(z)}, \quad (10)$$

где $B = A_1 = (1+A/\mu)\nu$, ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Значения функций безразмерных компонент скорости $F(z)$, $G(z)$ и $H(z)$ представлены на рис. 5.

$$\text{Параметр} \quad v^* = \sqrt{\frac{\omega(r)}{B}} \quad (11)$$

характеризует интенсивность закрутки потока на каждом радиусе в начальном сечении и однозначно связи со степенью расширения рабочего тела в реакторе. На рис. 5 представлено распределение функций F (а), G (б) и H (в) по длине z вихревой зоны реакторов. Анализ графиков (рис. 5) позволяет сделать вывод о том, что по длине реактора интенсивность движения газовых потоков вследствие закрутки существенно изменяется. Чем сильнее закручен поток, тем ближе к завихрителю потока можно достичь максимальных значений радиальных составляющих скорости.

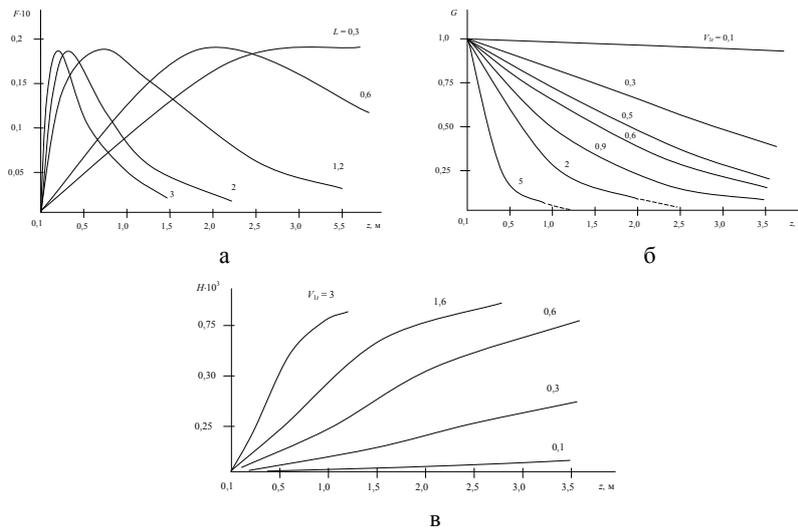


Рис. 5. Распределение функций F (а), G (б) и H (в) по длине z вихревой зоны аппарата.

Это явление определяет достижение средней температуры несущей среды. В лучшем случае затухание вращения вдоль оси реактора должно происходить так, чтобы радиальная составляющая скорости всё время находилась на гребне кривых представленных на рис. 5,а.

К сожалению, управлять этим процессом пока невозможно, и скорости устанавливаются сами собой. Тангенциальная составляющая скорости по длине реактора значительно снижается. Чем выше интенсивность закрутки рабочего тела, тем сильнее проявляется закон снижения скорости движения потока по длине аппарата (рис. 5, б).

Закон снижения одинаков на любом радиусе, а его интенсивность зависит от закона распределения угловой скорости по радиусу в начальном сечении и задаётся исходными параметрами рабочего тела и геометрией реактора.

Характерно, что аксиальные составляющие скорости рассматриваемого течения направлены к завихрителю, обеспечивающему вращение диска (рис. 5,а).

Переходя к определению поля скоростей, создаваемых центральным потоком, отметим, что потенциал точечного стока производительностью Q в полуограниченной цилиндрической трубе уже получен [17]:

$$\varphi_1 = \frac{Q}{\pi r_0} \left[-\frac{z}{r_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{S_n J_0^2(S_n)} \exp\left(-S_n \frac{z_0}{r_0}\right) \right], \quad (12)$$

а потенциал кольцевого потока находится из (12) при помощи интегрального преобразователя Ханкеля [18]

$$\varphi_0 = \frac{Q_0}{\pi r_0} \left[\frac{z}{r_0} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0^2(S_n)} \exp\left(-S_n \frac{z_0}{r_0}\right) \right] \quad (13)$$

где r_0 – радиус реакционной камеры, м; Q_0 – расход кольцевого потока, $\text{нм}^3/\text{г}$; Q – расход осевого потока, $\text{нм}^3/\text{г}$.

Результирующая потенциальная функция течения будет иметь вид:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_1. \quad (14)$$

В формулах (12), (13) количество S_n является корнем уравнения $J_k(S_n) = 0$, где $J_0(S_n)$ и $J_1(S_n)$ – функции Бесселя вещественного аргумента первого и нулевого порядка соответственно.

Выделив из (14) мнимую часть, получим функцию тока искомого течения:

$$\varphi = (Q_0 - Q) \frac{\sin \alpha}{\pi r_0} \left\{ 1 + \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0(S_n)} - \sum_{n=i}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0(S_n)} \right] \exp(-S_n) \right\}, \quad (15)$$

где $\alpha = \text{arctg } z/r$.

Искомые компоненты осевой и радиальной составляющих скорости осевого течения определяем из соотношений:

$$W_2 = -d\varphi/dr \quad (16)$$

$$U_2 = d\varphi/dz \quad (17)$$

Продифференцировав выражения (16) и (17), получим

$$W_2 = \frac{(Q_0 - Q)}{\pi r_0} \left\{ \cos\left(\text{Arctg} \frac{z}{r}\right) \frac{1}{[1 + (z/r)]r^2} \times \right.$$

$$\times \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0(S_n)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0^2(S_n)} \right] \sin\left(\text{Arctg} \frac{z}{r}\right) \times$$

$$\times \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0(S_n)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0(S_n)} \right] \frac{S_n \exp(-S_n)}{r}. \quad (18)$$

$$u_2 = \frac{(Q_0 - Q)}{\pi r_0 r} \cos\left(\text{Arctg} \frac{z}{r}\right) \frac{1}{1 - (z/r)^2} \times$$

$$\times \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0(S_n)} \exp(-S_n) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(S_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_0(S_n)} \exp(-S_n) \right] \quad (19)$$

Результирующие компоненты радиальной и аксиальной составляющих скорости газового потока в соответствии с выражениями (8), (9), (18), (19) имеют вид

$$U_c = U + U_2 \quad (20)$$

$$W_c = W + W_2 \quad (21)$$

Описанная выше картина течения, которая построена с помощью предлагаемой модели находится в полном соответствии с гипотезой взаимодействия вихрей [10], положенной в основу объяснения физической природы разделения потоков.

Уравнение распространения тепловой энергии в турбулентном потоке рассматриваемой области имеет вид:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + U_c \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} - \frac{v}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon} + \overline{W}_c \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} - \rho C_p r \overline{u'_c T'} \right) +$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\pi \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon} - \rho C_p v \overline{v' T'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} - \rho C_p \overline{w'_c T'} \right); \quad (22)$$

$$- \rho C_p r \overline{u'_c T'} = D \frac{\partial \bar{T}}{\partial r}; \quad (23)$$

$$-\rho C_p r v \overline{T} = \frac{D}{r^2} \frac{\partial \overline{T}}{\partial \varepsilon}; \quad (24)$$

$$-\rho C_p r w_c \overline{T} = \frac{D}{r} \frac{\partial \overline{T}}{\partial z}. \quad (25)$$

Для стационарного теплопроцесса при осесимметричном течении вихревого потока из уравнения (22) введя (23), (24), (25) получим:

$$\frac{\partial T'}{\partial r} + \frac{w_c}{u_c} \frac{\partial T'}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re } P_r} \left(\frac{\partial^2 T'}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} \right), \quad (26)$$

где $\text{Re} = \frac{U_c R}{\nu}$; $P_r = \frac{\nu}{D_0}$; $D_0 = \frac{D}{\rho C_p}$; $T = T T_0$; $z = \bar{z} r_0$; R – радиус реак-

тора; ν – коэффициент кинематической вязкости; D – коэффициент диффузии; C_p – теплоёмкость при постоянном давлении. Число P_r для исследуемого процесса с большой степенью точности может быть принято const по всей области.

Сам процесс энергетического разделения имеет тесную связь с турбулентностью потока вообще и с турбулентным трением в частности. Интегральный эффект воздействия сил турбулентного трения, воспринимаемый нами, в первую очередь, как сопротивление турбулентному течению, изучен в гидродинамике достаточно тщательно. При этом установлено явление автомодельности по числу Рейнольдса, начиная с величины порядка $\text{Re} > 10^4$. В рассматриваемом случае, в связи с очень большими скоростями рабочего тела, в зоне энергетического смешения поток сильно турбулизован по числу Рейнольдса, ($\text{Re} > 2 \cdot 10^4$), т.е. соблюдается автомодельность процесса. Следовательно, при изучении рассматриваемого процесса число Re может быть принято const в каждой расчётной формуле.

Решение уравнения (26) будем искать в виде:

$$T = f(\bar{r}) \varphi(\bar{z}) \quad (27)$$

$$\text{Тогда} \quad \frac{\partial T'}{\partial r} + f_0 \frac{\partial T'}{\partial z} = \zeta \left(\frac{\partial^2 T'}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} \right), \quad (28)$$

где $\zeta = \frac{1}{\text{Pe}} = \text{const}$, $f_0 = \frac{w_c}{u_c}$, Pe – критерий Пекле

$$\text{или} \quad \varphi \frac{\partial f}{\partial r} + f_0 \varphi + \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \zeta \left(\varphi \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + f \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \quad (29)$$

Продифференцировав (29) и разделив его на φ и f , получим

$$\zeta\varphi \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} - \varphi \frac{\partial f}{\partial r} = -\zeta f \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + f f_0 \frac{\partial \varphi}{\partial z}; \quad (30)$$

$$\frac{\zeta}{f} \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} - \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial r} = \frac{\zeta}{\varphi} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{f_0}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\lambda \quad (31)$$

где $\lambda - \text{const}$.

Уравнения (30), (31) можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\zeta}{f} \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} - \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial r} - \lambda = 0; \\ \frac{\zeta}{\varphi} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{f_0}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \lambda = 0. \end{array} \right. \quad (32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\zeta}{f} \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} - \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial r} - \lambda = 0; \\ \frac{\zeta}{\varphi} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{f_0}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \lambda = 0. \end{array} \right. \quad (33)$$

Откуда с учётом (16), (17) найдём

$$f'' - \frac{1}{\zeta} f' + \frac{\lambda}{\zeta} f = 0; \quad (34)$$

$$\varphi'' - \frac{f_0}{\zeta} \varphi' - \frac{\lambda}{\zeta} \varphi = 0. \quad (35)$$

Решение уравнения (34) можно представить в виде

$$f_1 = C_1 \exp[S_1^* r] + C_2 \exp[S_2^* r] \quad (36)$$

Решая характеристическое уравнение

$$S^2 - \frac{1}{\zeta} S + \frac{\lambda}{\zeta} f = 0 \quad (37)$$

получим окончательное решение (36) в виде

$$f = C_1 \exp\left(\frac{1}{2\zeta} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{\zeta}\right)^2 - 4 \frac{\lambda}{\zeta}} \cdot r\right) + C_2 \exp\left(\frac{1}{2\zeta} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{\zeta}\right)^2 - 4 \frac{\lambda}{\zeta}} \cdot r\right) \quad (38)$$

Причём $\left(\frac{1}{\zeta}\right)^2 - 4 \frac{\lambda}{\zeta} > 0; 1 - 4\lambda\zeta > 0$

$$\frac{1}{\zeta} f_0' - \frac{1}{\zeta} \lambda = 0, \text{ то есть } f_0 = 4\lambda\zeta + A. \quad (39)$$

Тогда уравнение (35) решим следующим образом:

$$\varphi = \exp\left[\int \frac{f_0}{\zeta} dz\right] \left\{ C_3 + C_4 \int \exp\left[-\int \frac{f_0}{\zeta} dz\right] dz \right\} \quad (40)$$

Выполнив в выражении (40) операции интегрирования, получим

$$\varphi(z) = C_3 \exp\left[\frac{A}{\zeta}(z + C_4)\right] - C_4 \frac{\zeta}{A} \quad (41)$$

Тогда

$$T' = \left\{ C_1 \exp\left[\frac{1}{2\zeta} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{1}{\zeta}\right)^2 - 4\frac{\lambda}{\zeta}}\right]r + C_2 \exp\left[\frac{1}{2\zeta} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{1}{\zeta}\right)^2 - 4\frac{\lambda}{\zeta}}\right]r \times \right. \\ \left. \times \left\{ C_3 \exp\left[\frac{f_0}{\zeta}(z + C_5)\right] - C_4 \frac{\zeta}{f_0} \right\} \right\}. \quad (42)$$

Учитывая, что $\lambda \rightarrow 0$, и обозначив в выражении (42)

$C_3 \exp\left[\frac{f_0}{\zeta}C_5\right]$ через C_3 , получим окончательно

$$T' = \left\{ C_1 \exp\left[\frac{r}{\zeta} + C_2\right] \right\} \left\{ C_3 \exp\left[\frac{f_0}{\zeta}z\right] - C_4 \frac{\zeta}{f_0} \right\}. \quad (43)$$

Коэффициент A определим из условия

$$\omega_c = (\bar{r}; \bar{z}) = (\lambda z + A)\mu_c(\bar{r}; \bar{z}). \quad (44)$$

Постоянные интегрирования в выражении (43) найдём из следующих условий

$$T = T_0 \text{ при } \bar{r} = 1; \bar{z} = 0 \quad (45)$$

$$T = T_0 \text{ при } \bar{r} = 0; \bar{z} = 0 \quad (46)$$

$$T = T_x \text{ при } \bar{r} = 0; \bar{z} = 2r_0 \quad (47)$$

$$T = T_r \text{ при } \bar{r} = 0; \bar{z} = L/r_0 \quad (48)$$

$$T = T_r \text{ при } \bar{r} = 1; \bar{z} = L/r_0 \quad (49)$$

$$T = T_r \text{ при } \bar{r} = 0; \bar{z} = 1 \quad (50)$$

$$T = T_r \text{ при } \bar{r} = 1; \bar{z} = 1 \quad (51)$$

Значение характеристики L , входящей в условия (48) и (49) можно определить на основании следующих соображений. Где-то на оси реактора есть точка, в которой радиальная и аксиальная составляющие скорости равны нулю [19]. В этом случае

$$d\varphi/dz_0 = 0 \quad (52)$$

$$N_{(r=0)} = 0; z = L. \quad (53)$$

Условия (52), (53) позволили определить значение μ из выражения, соответствующего требованию:

$$\mu = \frac{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_0(S_n)} \exp\left[-S \frac{L}{r_0}\right]}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_0^2(S_n)} \exp\left[-S \frac{L}{r_0}\right]}. \quad (54)$$

Результаты расчётов, выполненных по формуле, представлены на рис. 6.

Движение после смешения потоков в рабочей полости реактора соответствует режиму идеального вытеснения [3].

На рис. 6 представлено распределение относительной средней массовой температуры μ в зоне идеального вытеснения от параметра L/r_0 .

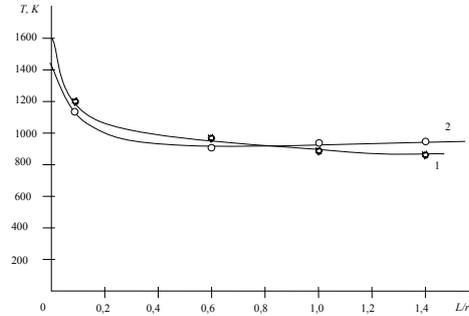


Рис. 6. Распределение средней массовой температуры потока μ от параметра L/r_0 .
1 – технологический циклон; 2 – горизонтальный реактор.

Из анализа данных на рис. 6 следует, что при определенных соотношениях Q/Q_0 характерный радиус кривизны канала не оказывает заметного влияния на длину зоны рециркуляции. Проведя обобщение полученных результатов на рис. 6, можно получить суммарную зависимость, которая указывает на то, что полное перемешивание потоков обратно пропорционально углу расширения слоя смешения, то есть углу закрутки потока. В результате получим

$$\frac{L}{L_0} = 0,55(\operatorname{tg} y'_1 + \operatorname{tg} y'_2) \frac{1-\alpha}{\alpha}, \quad (55)$$

где α – степень загромождения турбулизирующего потока, а, учитывая, что $\alpha = h/H$, где H диаметр реактора, h размер (толщина разделительных перегородок), то получается суммарная зависимость отношения длины зоны рециркуляции к толщине перегородки l/h :

$$l/h = 1,19 \exp\left(0,5 \frac{\alpha}{1-\alpha} - 0,2\eta\right), \quad (56)$$

где $\eta = W_0/U_0$.

Таким образом, очевидно, что степень закрутки потоков $v^* = \sqrt{\frac{\omega(r)}{B}}$

уравнения (11) предопределяет интенсивность смешения потока, которая определяет среднюю температуру на входе в зону реактора и собственно эффективность обезвреживания. Чем меньше зона $l/h(4r_0)$, тем более эффективно достигается средняя температура потока и соответственно больше время деструкции органических примесей в топочной зоне реактора, что позволяет обеспечивать время пребывания более 2 с.

Таким образом, приведенную методику анализа и расчёта для систем термического обезвреживания газовых выбросов можно применять при расчётах систем очистки газовых выбросов с одновременной утилизацией бросовой энергии технологических газов в различных производствах.

Список литературы: 1. *Luo Gang., Li Rongxian, Zhou Lixing* Numerical simulation of gas-particle flows with different swirl numbers a swirl burner // *Tsinghua Sciand Technol.* – № 1. – 2005. – Р. 96-99. 2. *Протопопов Р.Я., Філенко О.М., Шапорев В.П.* Анализ термического метода знешкодження газових викидів від органічних сполук // Сборник научных трудов "Иновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережения, охрана окружающей природной среды". Харьков. УкрГНТЦ "Энергосталь". – 2012, – С. 379-386. 3. *Р.Я. Протопопов, О.Н. Філенко, В.П. Шапорев* О моделировании реакторов для термической нейтрализации органических примесей // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* Харьков Технологич. Центр. 2/12 (56). – 2012. – С. 22-27. 4. Анотаційний звіт про виконання роботи "Аналіз варіантів моделей хіміко-технологічних процесів і розробка моделі хімічного процесу термічного знешкодження газоповітряної суміші, що утворюється у виробництві вінілових шпалер" ТОВ ЕНКІ (дог. №87312 від 10.03.2006 р.) / Харків. – 2000. – 40 с. 5. *Л.А. Дорфман, В.А. Маев* Численное исследование взаимодействия изотермических противоположно закрученных потоков в кольцевом канале // *Инженерно-физический журнал*, 1981, т. XLI № 4. – С. 674-677. 6. *А.А. Свириденков, В.В. Третьяков, В.И. Ягодин* Об эффективности смешения коаксиальных потоков, закрученных в противоположные стороны // *Инженерно-физический журнал*, 1981, т. XLI №3. – С. 407-413. 7. *И.В. Сергеев, Л.П. Халпанов, П.И. Цой и др.* Модели закрученного дисперсионно-кольцевого потока // *Теорет. основы хим. технологии*, 1980, т. XIV №5. – С. 777-779. 8. *Кирипченко В.Е.* Применение крупномасштабных вихревых труб для улавливания пыли // *Пром. И сан. Очистка газов.* Научно-технический реферативный сборник. – 1983. – №1. – С. 6-7. 9.

М.Е. Дейч Техническая газодинамика. – М.: Энергия. – 1974. – 592 с. **10.** Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М: Машиностроение, 1969. – 184 с. **11.** В.М. Задорский Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода. Киев: "Техника". – 1982. – 208 с. **12.** Вилля В. Теория вихрей. М.-Л.: Гостехиздат, 1935. – 372 с. **13.** Вопросы аэродинамики и теплопередачи котельно-топочных процессов / под ред. Кнорре Г.Ф. – М.-Л.: Энергия, 1958. – 158 с. **14.** Теория топочных процессов / под ред. Кнорре Г.Ф. – М.: Энергия, 1966. – 342 с. **15.** Бай-Ши-И Турбулентное течение жидкостей и газов. Пер. с англ. М. изд. иностр. лит., 1962. – 400 с. **16.** Лойнянский Л.Г. Механика жидкости и газов. М.: Наука, 1973. – 904 с. **17.** В.К. Щукин Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М.: Машиностроение. – 1970. – 400 с. **18.** И.Н. Бонштейн, К.А. Семендяев Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука. – 1986. – 544 с. **19.** Кирпиченко В.Е. Вихревой энергоделитель с пылеприёмником // Пром. и сан. очистка газов. Научно-технический республиканский сборник. – 1980. – №3. – С. 8-9.

Поступила в редколлегию 05.07.2012

УДК 532.516

Исследование рабочего процесса в реакторах для термического обезвреживания вентиляционных выбросов в производствах технической бумаги / Протопопов Р.Я., Себко В.В., Шапоров В.П. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 160-174. Бібліогр.: 19 назв.

Проведено теоретичний аналіз взаємодії закручувальних гарячих потоків у реакторах різного типу. Отримано моделі та рівняння для розрахунку поля швидкостей, шляху зміщення, а також енергетичного розподілу теплових потоків та середніх температур.

Ключові слова: реактори, закручені гарячі потоки, моделі розрахунку.

A theoretical analysis of hot swirling flows interaction in reactors of various types is carried out. Models and equations for computations of the velocity field, path of mixing and energetic distribution of heat flows and average temperatures are obtained.

Keywords: reactors, hot swirling flows, calculation models.

І.М. ЄФАНОВ, канд. фіз.-мат наук, директор, ПФ "Золотий переріз", Харків

Ю.М. ЛАТИНІН, канд. фіз.-мат наук, доцент, УПА, Харків

В.С. ЛУПІКОВ, д-р техн. наук, професор, НТУ "ХПІ"

Р.Г. ЯРЕМЕНКО, канд. фіз.-мат наук, консультант, ПФ "Золотий переріз", Харків

**ВІТЧИЗНЯНІ ПОСІБНИКИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ:
АНАЛІЗ СТАНУ**

Виконаний аналіз вітчизняної навчальної літератури з енергозбереження для загальноосвітніх закладів. Зроблені висновки по її вдосконаленню.

Ключові слова: навчальна література, енергозбереження, загальноосвітні заклади.

Вступ. Збереження енергетичних ресурсів та їх ефективне використання є найактуальнішою проблемою людства. Особливо гостро вона стоїть перед Україною, де на виробку одиниці промислової продукції витрачають у 5 разів більше енергоресурсів, чим у промислово розвинених країнах. Не дивлячись на низку Постанов Уряду, Верховної ради, Енергетичної програми на 2010-2030 р., технології з енергозбереження ще слабо втілюють в життя. Дійсно, основний упор в Україні роблять на додатковий розвиток електроенергетики, зокрема атомної, але не на втілення новітніх енергозберігаючих технологій чи розвиток альтернативних джерел енергії. Тому проблему енергозбереження можна віднести в Україні до системних. Суттєво впливає на енергозбереження відсталість технологій, зокрема в секторі житлово-комунального господарства.

В Україні ще не набула відповідної підтримки просвітницька діяльність держави. Газета "Сьогодні" організовує конкурс на найкраще рішення будь-якого мешканця України з енергозбереження "Сохраним энергию вместе". Але це є лише окремим штрихом у цій проблемі. В школі не читають цього курсу. Посібників, які б були зорієнтовані у майбутнє, зовсім обмаль.

Постановка завдання. Проаналізуємо існуючу літературу з енергозбереження для загальноосвітніх закладів під кутом доцільності й відповідності сучасним вимогам з енергозбереження та суспільства.

© Єфанов І.М., Латинін Ю.М., Лупіков В.С., Яременко Р.Г., 2012

До аналізу обрано 3 посібника, що написані Праховником А.В. та його колегами [1-3].

Виклад основного матеріалу. З точки зору методики подання матеріалу посібник може бути взірцем. Він затверджений МОН молоді та спорту України, видавався двічі (у 2008 та 2010р.), має обсяг 128 стор. (друге видання), що сформовані у 7 розділів. Він містить вступ, перелік рекомендованої літератури (31 наймен.), заключення, словник термінів. Для кращого розуміння автори більш доцільно структурували матеріал, ввівши такі окремі рубрики, як "Це цікаво", "Для обговорення", "Подумайте та дайте відповідь", "Практикум", "Чи Ви знаєте, що ...", "Сторінки історії...", "Завдання".

Не вдаючись у глибину, посібник в цілому нормально розглядає проблему енергозбереження. Але якщо достеменно проаналізувати його змістовну частину, то виникає низка питань. Чи існує спадкоємність між понятійними апаратами у галузі енергозбереження та його кореляція з термінологією, що вже використовують інші навчальні дисципліни? Систематизований характер дисципліни "енергозбереження" пред'являє суворі вимоги до змісту основних положень. Дійсно, знання першого роду, а саме теорії, закони, закономірності, основні поняття повинні корелюватися з тими, на яких базуються інші навчальні дисципліни.

Підручник повинен готувати школярів до майбутнього самостійного життя. Отож він повинен опиратися на сучасну дидактику та технологічний розвиток суспільства. Посібник [3], на наш погляд, має суттєвий недолік: він більше спрямований на теоретичний, суто просвітницький бік проблеми енергозбереження, тобто на знання. Практичний бік питання, а саме спрямованість на виробку вмінь, навичок енергозбереження у ньому представлені набагато менше. Лабораторні чи лабораторно-практичні роботи, де учень безпосередньо побачив сучасні вимірювальні прилади, зокрема лічильники чи автоматичні диференційні вимикачі і прилучився до сучасних технологій, з якими йому прийдеться стикнутися у майбутньому житті, відсутні. Вважаємо, що без наявності такого виду занять вироблення навичок потребує більшого часу, не дозволить закріпити навчальний матеріал і не дасть суттєвого позитивного результату. Отож, зберігати будь-які види енергії без виробки відповідних практичних навичок та вмінь неможливо. Зауважимо, що хоча учні використовують електрику, воду, тепло, але платять за них їхні батьки. І тому треба, щоб і батьки залучалися до проблеми енергозбереження. Посібник треба так сконструювати, щоб він був спрямований, не тільки на учня, але і на його сім'ю чи батьків.

З цією метою треба бажано формулювати такі питання, ставити завдання, коли б учню треба було звертатися до батьків. Якщо останні не володіють тими чи іншими знаннями та навичками, то учень разом з ними розв'язуватиме те чи інше завдання. В цьому випадку сумісне навчання давало б більш ефективним, а виробка навичок енергозбереження, зокрема електричної, дало позитивний результат.

Проведемо системно-структурний аналіз змісту, оцінимо систему використаних при цьому понять. Щоб потім не виникла проблема перевчити людину, що робити важче, матеріал підручника в якості прикладів і конкретики повинен використовувати сучасну матеріально-технічну базу суспільства. Він не повинен опиратися на застарілу техніку. Будь-яке навчальне видання повинно готувати школярів до майбутнього самостійного життя. Розглянемо з цього боку наскільки він робить цю справу.

Активно і самостійно учень почне діяти через термін, що не менше 3-5 років. Тому будь-який підручник повинен опиратися на сучасний стан техніки та технологій. І хоч в будь-якому віці ми повинні вміти заощаджувати енергію, але свідомо і самостійно він почне це робити через 3-5 років. Нажаль посібник базується на застарілій технічній базі. Зокрема, учень, щоб розрахувати спожиту електричну енергію за минулу добу, користується застарілим лічильником і кожен раз повинен віднімати покази. Але коли він вийде у самостійне життя такі лічильники відійдуть у минуле. Сучасні багатофункціональні електронні лічильники рахують спожиту електричну енергію за будь-яку добу, місяць, рік тощо. Тому наводити у посібнику застарілий двохтарифний електромеханічний лічильник недоцільно: це не тільки вчорашній, але позавчорашній день. Тому і сучасний підручник з електротехніки, що призначений готувати вчителів обов'язково повинен містити розділ чи параграф "Збереження та ефективне використання електрики при її виробництві, розподілу та споживанні". Зауважимо, що вітчизняні підручники з електротехніки для усіх ланок навчання не містять такого розділу. І якщо у вищій школі для студентів інженерного фаху читають дисципліни стосовно екологічних і енергетичних аспектів, то для гуманітарного профілю не завжди.

Отож, проблема енергозбереження є комплексною і загальнодержавною. З чого треба починати? По перше, з прийняття законів, щоб зберігати електричну енергію, воду газ тощо було б вигідно. Друга проблема встановлення багатофункціональних лічильників, які дозволяли оперативно та ще з більш високою точністю визначати спожиту енергію, ресурси. Якщо ми можемо виміряти кількість спожитого, то

більш достеменно знаємо дещо про властивості використаних приладів, технологій, а коли не можемо, то нічого і не знаємо про них. З іншого боку, треба відповідно готувати вчителів, зокрема фізики, хімії, у яких при підготовці треба виробляти відповідні навички енергозбереження. Доцільно хоча би як елективний чи факультативний курс ввести у загальноосвітніх закладах дисципліну з енергозбереження.

Посібник, скоріш за все, є переробкою російського видання. Зокрема, в нього додали розділ, що пов'язаний з впливом на навколишнє середовище українського паливно-енергетичного комплексу. Він є більш структурованим, в ньому змінені малюнки і введені власні світлин тощо. На наш погляд, це зробило його більш конкретним та інтересним. Але мабуть його також спочатку писали російською, а потім переклали на українську. Завдяки цьому виникли деякі негаразди. Дійсно російському "Заключение" відповідає українське слово "висновок" (Великий тлумачний словник сучасної української мови такого слова не містить). Наведемо інші приклади: экс СССР, (треба СРСР), російського вченого Моисеева Н.Н. переклали, як Моїсеєв М.М. і т.д.

Автори посібника не вказують, які саме розділи посібника спрямовані на вироблення відповідних навичок з енергозбереження. На наш погляд, к таким, можна віднести практикум, завдання. Але чи можуть вони виробити практичні навички енергозбереження? Скажімо у практикумі учню дають завдання стежити на протязі тижня за показами звичайного електромеханічного лічильника електричної енергії. Учень, добове споживання електрики записує у таблицю, а вже потім - побудує графік. Після того, як школяр придбав навички доцільного використання енергії (за них ми поговоримо пізніше), він знову записує такі ж самі покази на протязі тижня, а і потім іншим кольором побудує графік і робить висновки. Але, скоріш за все, доцільних висновків він може і не зробити. І ось чому. Існують сезонні коливання у споживанні електрики. І замість зменшення показів лічильника він може отримати їх збільшення. По друге, одна людина, якщо і доцільно використовує електричну енергію, а всі останні ні, то і її економії він може не помітити. Більш того, у конкретній сім'ї у період тижня, не дивлячись на міри по заощадженню електрики, можуть працювати потужні прилади, зокрема бойлер, електрична піч, опалювальні прилади, кондиціонер тощо. Саме вони і не дадуть побачити позитивний результат. Більш того, вироблення навичок й вмінь потребує значного часу. А за цей період у квартирі можуть з'явитися додаткові електричні прилади, що споживають значну частку енергії. Дійсно, не дивлячись на заощадження електричної енергії сучасними побутовими приладами (холо-

дильниками, пральними машинами, плитами тощо) споживання її у побуті, на Україні постійно зростає, завдяки збільшенню їх кількості.

Інше завдання. Учні рекомендують піти до магазину, що продає холодильники і взнати у продавців термін їх роботи та споживання електрики. Після цього він повинен розрахувати економічний ефект від купівлі більш ефективного холодильника, що заощаджує електричну енергію. Термін роботи холодильника не перевищує 10 років, хоча він може працювати і далі. Холодильник "Атлант" місткістю 330-400 літрів споживає за рік біля 400 кВт·год, а скажімо класу A^+ – 300-330, а A^{++} – 260-300 кВт·год/рік (SAMSUNG, LG). Отож за рік економимо близько 140 кВт·год. При ціні за 1 кВт·год приблизно 0,3 гривні економія за рік складе 40, а за 10 років 400 гривень, що дуже мало. Отож такий практикум мало що дасть учню. От якщо б одиниця спожитої енергії (1кВт·год) коштувала, як написано у посібнику 10-12 центів, тобто приблизно 1 гривню, то економічний ефект був би більш суттєвим: 1500 гривень.

Друге завдання. Учні рекомендують для визначення споживання незрозуміло яких шкільних приладів підключити їх до портативного лічильника. По перше, неясно звідкіля такий візьметься у школі. По друге, як правило, ці прилади будуть приєднані до мережі живлення. Тому спочатку їх треба від'єднати від неї. Та й зібрати таке коло самостійно йому ніхто не дозволить: мережа живлення 220/380 В є небезпечною для його життя. Таке коло може зібрати тільки фахівець електрик. Більш того, йому радять мати люксметр, щоб визначати освітленість у приміщенні.

Деякі визначення є не тільки недосконалими, але й помилковими. Наприклад, 1 ват потужності – це робота ... суперечить дефініції терміну "потужність". Насправді цей параметр характеризує швидкість виконання приладом (двигуном, лампочкою тощо) відповідної роботи і є такою швидкістю виконання роботи, при якій за 1 секунду виконується 1 Дж роботи. Та й взагалі у посібнику енергію вимірюють у **кВт**, **кВт/год**. Генератор визначають як "пристрій, який перетворює механічну енергію у електричну". У визначенні фотоелемента подані лише напівпровідникові і т.д., реактор має 3 сенси це і потужна котушка індуктивності і хімічний апарат і пристрій, де відбувається керована ланцюгова реакція поділу атомних ядер деяких елементів. Тому слово реактор треба вживати тільки з терміном атомний, генератор зі словом електричний. Декотрі вислови є помилковими: "...ядерна енергія перетворюється у... турбіні на електричну".

У статті [4] сформульовані вимоги, яким повинні відповідати дефініції законів, положень чи теорем, викладених у навчальній літературі. Автори посібника вважають, що не тільки формулювань законів щодо

енергії існує багато, але навіть і назв. Наведемо їх і проаналізуємо.

Чи можна вважати формулювання "першого енергетичного закону" або, як говорять автори, закону її кількості. Перший енергетичний закон: "Кількість енергії у Всесвіті незмінна", або "Енергія може змінювати місце". По перше, у дефініцію бажано, щоб входили терміни чи поняття, які мають однозначне трактування. Всесвіт не є таким. Відомо, що закон збереження енергії має місце лише для ізольованих, замкнених систем. Чи можна всесвіт вважати таким? Сучасна наука на таке запитання відповіді не дає.

Та й взагалі, на погляд авторів посібника енергія є: первинна, вторинна, кінцева, корисна, шкідлива, біоенергія, втрачена, хімічна, світла, хвиль, добрив, природного газу, сонця тощо. Навіть з визначення витікає, що енергія наче жива істота "може змушувати до взаємодії, пов'язаної з переходом енергії в іншу форму". Не дивно, що закон збереження та перетворення енергії звучить так: **"Енергія Всесвіту є незмінною"**. Тому, якщо замість слова енергія поставити слово "всодержитель", то нічого не зміниться. Дійсно **енергія вічна** (назва параграфу). Та й визначення енергії дається таким чином, що наче це не параметр, введений людиною для описання процесів живої й неживої природи, а реально існуючий об'єкт. Більше того, автори зазначають, що визначення енергії не зможе сформулювати жоден відомий фізик. Але вічна тільки матерія, але не величина чи параметр, який описує процеси та їхню спрямованість у замкнених системах. Та й дефініція поняття енергії не спрощує проблему: "енергія – міра того, що може відбутися", що змушує що-небудь відбутися. Пояснення енергії хімічної у словнику посібника: "...при перетравленні їжі виділяється енергія у вигляді теплової або світлової" є також помилковим.

Автори формулюють визначення енергії так, що її можна вважати наче жива істота. Дійсно, вона "може змушувати до взаємодії, пов'язаної з переходом енергії в іншу форму". Відомо, що будь-якій масі речовини притаманна енергія: $E=mc^2$. Людина лише організовує технологічні процеси, при яких енергія ресурсів, зокрема хімічна, газу чи вугілля, переходить з одного виду в інший (тепло) і може при цьому ще виконати корисну роботу: нагріти воду, зробити пар, який, обертаючи турбіну і генератор, де кінетична енергію перетвориться в електричну. Чи можна володіти енергією? На наш погляд, ні. Але, у випадку, коли вона не є величиною чи параметром, що характеризує процеси у системі, а є живою чи неживою істотою, то таки так можна. Можна володіти енергоресурсами, зокрема первинними: нафтою газом, вугіллям тощо, але не енергією. І не буває нерівномірного розподілу

енергії (назва параграфу). Ось нерівномірна виробка та споживання на Землі різними країнами дійсно має місце.

Що стосується другого закону (закону якості енергії), який в школі не вивчають. Тому формулювати його треба простими й зрозумілими словами. По суті він є другим началом термодинаміки і визначає напрямок процесів у замкненій (ізолюваній) термодинамічній системі. Наведемо ці формулювання. **"Коли енергія у певній кількості перетворюється на іншу форму, якість енергії знижується", "Неможливо створити машину, яка повністю перетворювала певну кількість теплової енергії на корисну роботу", "Високоякісна енергія здатна перетворюватися на низькоякісну з малими втратами, але зворотне перетворення неможливе"**. Ясно, що ці дефініції є зовсім різними. У учня може виникнути питання: яке формулювання є найбільш загальним? У першому та другому формулюванні слова "у певній кількості" є зайвими. Дійсно перетворюється енергія, але не її певна кількість. По друге, будь-яка фізична величина без кількісної міри чи одиниці виміру не має сенсу. По третє, мабуть доцільніше вважати не законом, а принципом з формулюванням: "На протязі значного часу у будь-якій ізолюваній системі протікають процеси зі зменшенням якості енергії".

Ілюстрацій у посібнику достатньо. Це дуже добре. Але чомусь не всі малюнки мають підписи, особливо у останньому 7-му розділі. Позитивним моментом посібника є наявність словника. Але багатьох важливих термінів в ньому немає. Отож, якщо автори вводять новий термін чи поняття, які є найважливішими, то бажано вводити їх у словник. Наприклад, визначення біосфери, коеволюції тощо. Деякі дефініції у ньому формулюють одним реченням, що містить 50-60 слів. Пересічному учню запам'ятати важко, не говорячи про те, щоб зрозуміти зміст, особливо коли в них зустрічаються слова, сенс, який йому є незрозумілим. Отож, у визначеннях основних понять та термінів бажано вживати слова, інші терміни, які вже знайомі учням, широко вживаються чи будуть вживатися у майбутньому навчальному процесі. Недоречно використовувати слова чи терміни, які є невідомими. Наведемо приклад. Слово жарівка (звичайна лампа розжарювання не знайти у українських словниках, прекурсор, етери, коеволюція, ексергія, скидний енергетичний потенціал, регенератори "скрубери", "рекуператори" і т.д. не зустрічатимуться у підручниках для загальноосвітніх закладів, зокрема фізики, хімії. Бажано не вживати латинські назви елементів: карбон, сульфур, нітроген тощо. Замість них треба використовувати ті, що є у підручниках зокрема хімії: вуглець, сірка, азот, тощо.

Щодо переліку рекомендованої літератури. Незрозуміло ким во-

на рекомендована? Скажімо у переліку фігурує іноземна, яку учень не зможе достати, не говорячи вже прочитати. Такого у переліку основної літератури не повинно бути.

Чи є доцільним (хоч автори і вважають, що немає безглузвих запитань) (див. підрозділ "подумайте і дайте відповідь") таке запитання: "Що таке квоти? І чи варто Україні купувати чи продавати квоти?" Таке питання не є конкретним. Отож і відповідь може бути такою. Скажімо Україна продавала свої квоти на викид парникових газів. Чи доцільно це було. На наш погляд, навіть фахівець не дасть відповіді на таке запитання. Що ж казати про школярів, знання яких є обмеженими. Дійсно, з точки зору окремої держави, вигідно продавати, а з точки зору людства – ні. Деякі завдання вже завтра стануть безглуздими чи втратять сенс. Скажімо рекомендація "намагайтеся заповнювати повністю пральну машину білизною". Але сучасні машини мають інтелектуальний діагностичний центр. Останній визначає скільки білизни у барабані. У залежності від цього машина набирає стільки води та обирає режим роботи, що економить електрику. Зауважимо, що і рекомендація вимикати прилади з мережі, що працюють в режимі очікування (телевізор, пральна машина, піч для випікання хліба тощо), у майбутньому може стати безглуздою. Дійсно, є вже розробки, де в цьому режимі прилад електрику не споживає (зокрема деякі пральні машини LG).

Чи є доцільним запитання: "Як часто ви розморозите холодильник"? Ручне розморозування стосується лише застарілих моделей. Такі практично не продають і вже не експлуатують. Сучасні моделі холодильників не потребують розморозування ані холодильної, ані морозильної камер. Лише деякі моделі потребують ручного розморозування, але тільки морозильної камери. Останньою користуються суттєво менше, ніж холодильною. Тому в двохкамерних апаратах (а таких більшість) розморозувати її треба рідше (приблизно раз на 4-6 місяці). За такий термін експлуатації за санітарними нормами його треба мити незалежно від того чи намерзла на випарнику вода або ні. Тому краще, щоб санітарна обробка внутрішнього простору холодильника співпадала з розморозуванням морозильної камери. Часте розморозування і необхідність теплової ізоляції заморожених продуктів, що знаходились у морозилці, потребує декотрого часу й зусиль. Дійсно, після завантаження морозилки продуктами, що в ній до цього зберігалися і температура яких під час розморозування підвищилася, холодильник, щоб вийти на нормальний режим, споживає додаткову електрику. В кінцевому рахунку ми витратимо більше енергії, ніж зекономимо, не говорячи вже про затрати часу.

Підсумовуючи вищезазначене, можна зробити такі **висновки**:

1. Вітчизняна література з енергозбереження для загальноосвітніх закладів ще тільки становиться. Нажаль, у значній мірі її ініціювали та підтримували за допомогою міжнародних фондів. Отож їй без сумніву притаманні недоліки, зокрема слабо опирається на власну вітчизняну практику та досвід.

2. Збереження енергоресурсів є проблемою людства, але не окремої країни. Отож, школяру необхідно отримувати конкретні знання і виробляти навички з енергозбереження. Формувати їх треба під час особистої його участі в процесі розробки та прийняття рішень.

3. Поняття та терміни з енергозбереження з'явилися, виходячи з вимог виробництва і спеціалістів цієї галузі. Це обмежує можливості їх впровадження в шкільне навчання: школяр не проводить власних розрахунків за спожиту енергію чи тепло і не сплачує купівлю приладів для побуту.

4. Для впровадження ідей енергозбереження у навчальний процес у загальноосвітніх закладах необхідно зміст основних положень і пов'язаних з ним дисциплін формувати на основі доступних школяру знань теорії. Доцільним було б введення у підручники з фізики, хімії, у главі "Електротехнічні роботи" підручника "Трудове навчання" параграфів про сучасні технології збереження енергоресурсів, зокрема формулювати основні і найбільш загальні висновки з енергозбереження та ефективного використання електричної енергії, води, тепла, тощо. А ще краще було б ввести окрему дисципліну з енергозбереження та екології. Слід широко використовувати і пропагувати не тільки міжнародний, але і вітчизняний досвід з енергозбереження.

5. Навчання повинно охоплювати усі її ланки, будь-яку людину. Без системного підходу до проблеми процесу навчання з енергозбереження в Україні, втручання держави і МНОМСУ у цей процес та його підтримку він не може бути ефективним.

Список літератури:**1.** Енергозбереження. Посібник для загальноосвітньої школи. Львів: Праховник А.В., Мельникова О.В., Конеченков А.С., Іншеков Є.М., Дешко В.І., Політра Друку. 2003. – 92с. **2.** Розвиток енергетичної освіти в середній школі/ за заг. редак. Праховника А.В. Київська нотна фабрика, Київ, 1999. – 271с. (навч. посібник для вчителів шкіл). **3.** Енергозбереження та пом'якшення змін клімату. Праховник А.В., Фірсов Л.Ф., Іншеков Є.М., Дешко В.І., Стрелкова Г.Г., Мельникова О.В. Посіб. для учнів загальноосвітніх закладів. Видання друге, доповн.-Київ 2010. – 128с. **4.** Латинін Ю.М., Міліх В.І. Вітчизняний підручник з електротехніки: аналіз стану шляхи становлення. Електротехніка і електромеханіка. 2004, № 4, С. 110-117.

Надійшла до редколегії 03.09.2012

УДК 378.1

Вітчизняні посібники з енергозбереження: аналіз стану / Єфанов І.М., Латинін Ю.М., [Лупіков В.С.], Яременко Р.Г. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 175-184. Бібліогр.: 4 назв.

Выполнен анализ отечественной учебной литературы по сохранению энергетических ресурсов для общеобразовательных учебных заведений. Сделаны выводы по ее совершенствованию.

Ключевые слова: учебная литература, энергосбережения, общеобразовательные учреждения.

An analysis of domestic educational literature on conservation of power resources for general educational institutions is carried out. Conclusions on its improvement are presented.

Keywords: educational literature, energy conservation, general educational institutions.

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 рт.

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.

Починаючи з 2011 р. всі статті проходять незалежне рецензування з підписом рецензента наприкінці статті.

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 "ХПИ", вул. Фрунзе, 21,
м. Харків, 61002, Україна.**

Електронний варіант відправляють за адресою:

varshamova_i@rambler.ru

Довідки за тел.:

секретар Варшамова Ірина Сергіївна, **mob. 0974604277.**

секретар Себякіна Наталія Валентинівна, **mob. 0667353882.**

УДК ... (10 pt)

В.Ф. БОЛЮХ, д.т.н., проф., НТУ "ХПИ", Харків

С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспірант, НТУ "ХПИ", 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.

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 структується 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, діаграма) 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 таблиця відокремлюються від тексту інтервалом в один порожній рядок 10 pt.

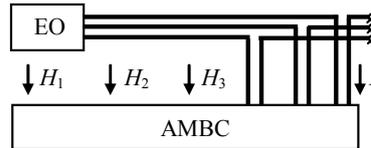


Рис. 1. Структурна схема вимірювань поля.

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. Серета 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 зразком, інші відомості – на розсуд автора.



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.

Надійшла до редколегії 24.03.2009

Назва статті / Автори статті // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 42 (948). – С. 49-60. Бібліогр.: 4 назв.

Для обеспечения условий устойчивой работы разнородных асинхронных генератора и двигателя соизмеримой мощности в автономном электромеханическом комплексе предложено распределение ёмкостей возбуждения машин по отдельным ветвям электрической цепи, не связанных между собой условиями феррорезонанса напряжений.

Ключевые слова: автономный электромеханический комплекс, асинхронный генератор, асинхронный двигатель, ёмкостное возбуждения, феррорезонанс напряжений, сопротивление намагничивающего контура.

The distribution of capacities in asynchronous generator and motor for individual branches of the electrical circuit, unconnected conditions ferroresonance voltages was proposed to ensure the stable work of the dissimilar conditions in machines of comparable power in the autonomous electromechanical complex.

Keywords: autonomous electromechanical complex, asynchronous generator, induction motor, capacitance excitement, ferroresonance voltages.

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Байда Е.И.

Математические модели подключения бистабильных поляризованных актуаторов к источникам энергии..... 3

Гречко А.М.

Экспериментальное исследование влияния вихревых токов в сердечнике магнитопровода на динамические характеристики электромагнитного привода..... 9

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Болюх В.Ф., Олексенко С.В.

Влияние конфигурации якоря на эффективность линейного электромеханического преобразователя.....18

Василів К.М.

Аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фаз модулятора під час роботи на активно-індуктивне навантаження27

Загирняк М.В., Ромашихина Ж.И., Калинов А.П.

Диагностика поврежденной стержней ротора в асинхронном двигателе на основании анализа его магнитного поля38

Мишин В.І., Чусько Р.М., Макаревич С.С.

Сумісна робота різнорідних асинхронних машин в автономному електромеханічному комплексі49

Петренко А.Н., Таянский В.Е., Петренко Н.Я.

Исследование температурного поля и тепловых потоков частотно-управляемого асинхронного двигателя61

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Гетьман А.В., Константинов А.В.

Цилиндрические гармоники скалярного потенциала магнитного поля токовой обмотки электромагнита66

Резинкина М.М., Гринченко В.С.

Снижение уровня магнитного поля подземных токопроводов электромагнитными экранами, состоящими из U-образных элементов..... 73

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

Гнатов А.В., Чаплыгин Е.А.

Экспериментальные исследования индукторов-инструментов для МИОМ79

Корытченко К.В.

Анализ условий прямого инициирования детонации в водородно-кислородной смеси атмосферного давления85

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ ТА МЕРЕЖІ

Зінзура В.В.

Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора99

Котиш А.І., Сіріков О.І.

Аналіз споживання та втрат електроенергії в електричних мережах 0,38 кВ комунально-побутового призначення110

Кубкін М.В.

Оцінка чутливості системи вимірювання високої напруги до зміни параметрів її елементів116

Сиротин Ю.А.

Неуравновешенный и несбалансированный режимы трехфазной четырехпроводной цепи120

Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А.

Распознавание типа дефекта высоковольтных силовых трансформаторов на основе анализа образов дефектов, построенных по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов129

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

Кругова О.С., Гришук Ю.С.

Огляд та аналіз конструкцій електрообігрівачів141

Полулях К.С., Медведева Л.А., Тополов И.И.

К анализу метрологических характеристик интегрирующих аналоговых преобразователей цифровых вольтметров146

Протопопов Р.Я., Себко В.В., Шапоров В.П.

Исследование рабочего процесса в реакторах для термического обезвреживания вентиляционных выбросов в производствах технической бумаги ...160

ІНФОРМАЦІЯ, ГІПОТЕЗИ, ДУМКИ

Єфанов І.М., Латинін Ю.М., [Лупіков В.С.], Яременко Р.Г.

Вітчизняні посібники з енергозбереження: аналіз стану175

Вимоги до оформлення статей185

27 вересня 2012 р. на 64-му році передчасно пішов з життя **Лупіков Валерій Сергійович** – талановитий вчений, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних апаратів Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Друзі, колеги й численні учні завжди пам'ятатимуть Валерія Сергійовича як висококваліфікованого педагога, щирого, доброзичливого керівника, людину високої внутрішньої культури, інтелігентності й доброти.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Збірник наукових праць

Серія
Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.
Теорія і практика

№ 49 (955) 2012

Відповідальний за випуск *І.Б. Обухова*
Відповідальний редактор д.т.н., проф. *Б.В. Клименко*
Технічні редактори: *І.С. Варшамова, Н.В. Себякіна*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ".
Кафедра Електричних апаратів, тел. (057) 7076864,
E-mail: varshamova_i@rambler.ru

Обл.-вид. № 145-12

Підп. до друку 12.10.2012 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. Riso-друк.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 11,1. Наклад 300 прим. 1-й з-д 1-80.
Зам. № 256. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ "ХПІ",
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.