

Т.М. МІЩЕНКО, Д.О. БОСИЙ (ДІПТ)

ГАРМОНІЙНИЙ АНАЛІЗ ПЕРВИННИХ НАПРУГИ ТА СТРУМУ НОВИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Проведено гармонійний аналіз струмів електровозів змінного струму при різних значеннях струму навантаження. Розраховано деякі показники міжнародного стандарту якості електроенергії.

Ключові слова: електровози змінного струму, дискретний, спектральний, гармонійний аналіз, коефіцієнт гармонійної складової, інтегральний показник гармонійного складу струму

Проведен гармонический анализ токов электровозов переменного тока при разных значениях тока нагрузки. Рассчитаны некоторые показатели международного стандарта качества электроэнергии.

Ключевые слова: электровозы переменного тока, дискретный, спектральный, гармонический анализ, коэффициент гармонической составной, интегральный показатель гармонической составной тока

The harmonic analysis of currents of electric locomotives of alternating current is conducted at the different values of current of loading. Some indexes of international standard of quality of electric power are expected.

Keywords: electric locomotives of alternating current, discrete, spectral, harmonic analysis, coefficient harmonic component, integral index of harmonic component current

ВСТУП

Загальновідомо, що найважливішим, виходячи з ряду факторів, є рівень гармонійних складових в напрузі та струмі в точках приєднання електричного навантаження. У системі електричної тяги таким навантаженням являється електрорухомий склад (ЕРС), зокрема, електровози. Тому виконаємо гармонійний аналіз для первинних (вхідних по відношенню до ЕРС) напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ нових електровозів змінного струму: ДС 3 та 2ЕЛ5к.

Вибір для зазначених досліджень цих електровозів обумовлений не лише їх новизною, але й наступним.

Згідно з думкою авторів роботи [1], подальший розвиток електровозобудування України повинно рухатись на основі принципу «гибкого экипажа». І це можливо на базі чотирирівневого електровоза ДС 3. Причому можливо отримання двох модифікацій двосистемного електровоза подвійного живлення 25 кВ, 50 Гц / 3 кВ потужністю 4800 кВт: вантажо-пасажирського на основі асинхронних тягових двигунів (АТД) на максимальну швидкість 140 км/год і пасажирсько-швидкісного (також на основі АТД) на максимальну швидкість 200 км/год.

Автори [2] також вважають, що електротяговий привод перспективних електровозів (Росії) повинен будуватись на базі безколекторних ТЕД, найімовірніше, на основі АТД, регулювання режиму роботи яких здійснюється за до-

помогою статичних перетворювачів частоти і кількості фаз, які складаються із імпульсного регулятора та чотириквadrантного перетворювача, від яких живиться автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією. кожний такий тяговий перетворювач живить два АТД. А таке схемотехнічне рішення і здійснено якраз в електровозі ДС 3.

В електровозі 2ЕС5к тяговий привод дещо інший: кожна його секція облаштована двома тиристорними перетворювачами, кожний з яких живить по два колекторні двигуни (постійного струму), для регулювання напруги на яких застосовано зонне регулювання. Цей електровоз цікавий (з позиції поставленої задачі) не лише сучасним виконанням, але й тим, що тиристорні перетворювачі використовують на діючих здавна електровозах ВЛ80с.

Необхідні для вирішення поставленої в цій роботі задачі числові експериментальні дані запозичено із роботи [3].

ВІЗУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОСЦИЛОГРАМ

На рис. 1 і рис. 2 приведені осцилограми (два періода) первинних напруги $u(t)$ і струмів $i(t)$ відповідно електровозів ДС3 та 2ЕС5к.

а)

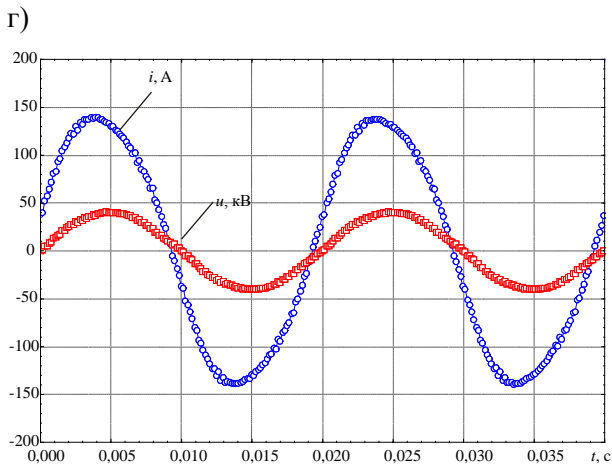
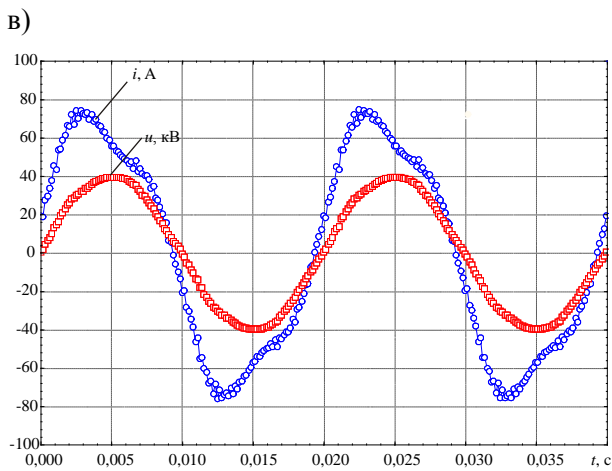
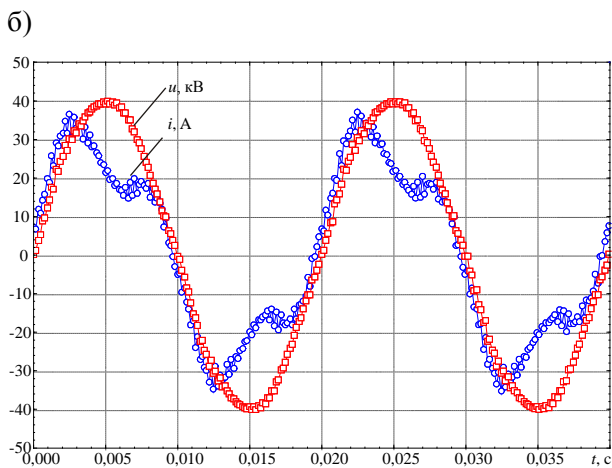
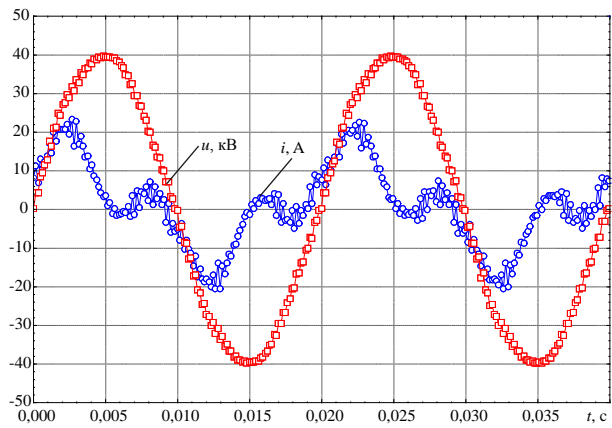
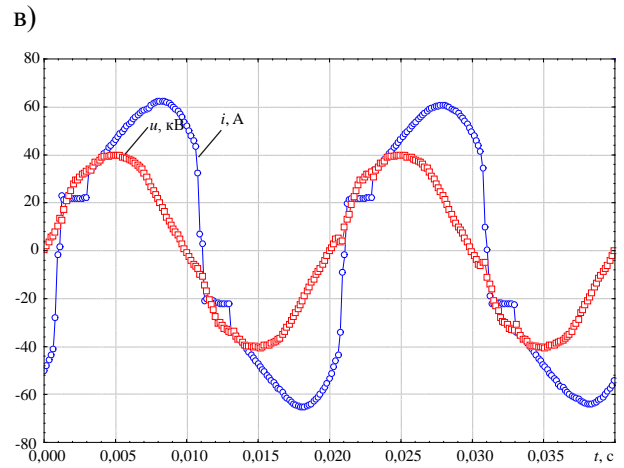
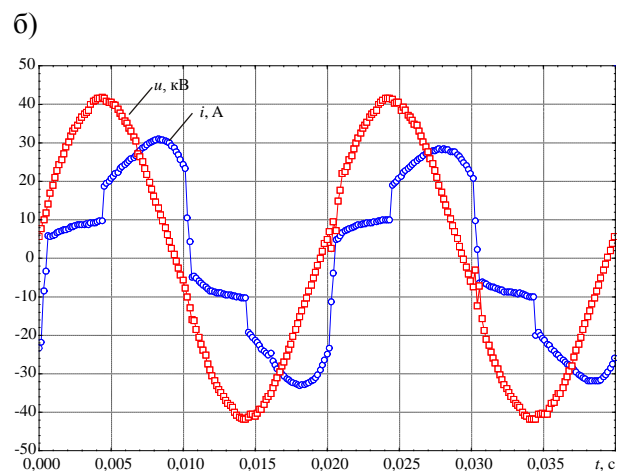
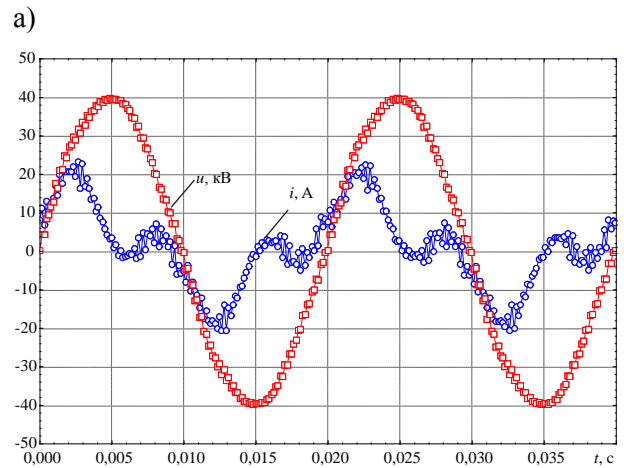


Рис. 1. – Осцилограми напруги та струму електрова- за ДСЗ при діючому значенні струму навантаження: а) – 10А; б) – 20А; в) – 50А; г) – 100А



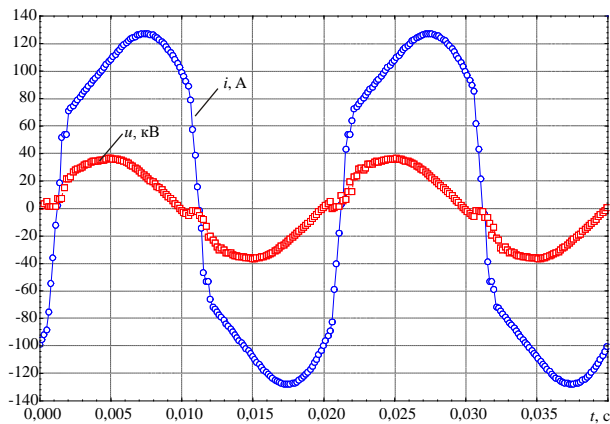


Рис. 2. – Осцилограми напруги та струму електровоза 2ЕС5к при діючому значенні струму навантаження: а) – 10А; б) – 20А; в) – 50А; г) – 100А

Як впливає із візуального аналізу цих рисунків, внаслідок того, що тягові підстанції, що живлять фідерні зони з зазначеними електровозами, є достатньо потужними джерелами електроенергії, тому синусоїдна форма вхідної напруги не спотворюється. Причому це спостерігається для обох електровозів і при різному навантаженні: в межах діючого значення струму I від 10 до 100 А.

Інша річ, що істотно, відбувається з формою тягового електровозного струму: вона помітно спотворюється внаслідок того, що силові кола електровозів містять потужні нелінійні реактивні елементи. Тому у подальшому проаналізуємо гармонійний склад та інші величини лише тягового струму. Це не зовсім відповідає нормам діючого в Україні ГОСТ 13109-97, в якому нормуються показники якості електроенергії, виходячи із норми і значень лише напруги, а струму цей стандарт не торкається. Однак міжнародні стандарти якості електроенергії (наприклад IEEE 519-1992) обмежують не лише гармонійний склад напруги живлення, але й струму, що споживається. При цьому, згідно з міжнародним стандартом IEEE 519-1981, основним фактором оцінки струму є інтегральний показник гармонійного складу струму I_{THD} (%) [4]:

$$I_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{49} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $I_{(n)}$, $I_{(1)}$ – діючі значення вищих (включно до 49-ї) гармонік і першої гармоніки.

Як впливає із рис. 1 і рис. 2 зі зменшенням тягового навантаження (тягового струму від 100 до 10 А) спостерігається збільшення ступе-

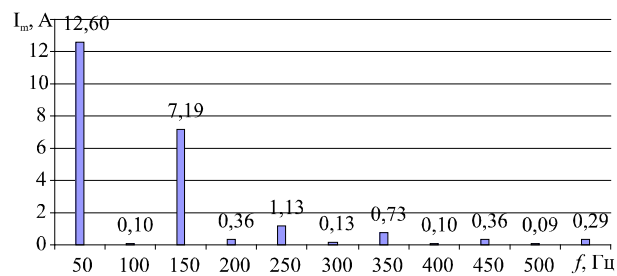
ня спотворення синусоїди миттєвої величини струму; при $I \gg 100$ А тяговий струм електровоза ДСЗ майже синусоїдний (рис. 1, з), а у електровоза 2ЕС5к – має місце хоч і незначний, але відхід від синусоїди (рис. 2, з). Тому, при однаковому навантаженні більші спотворення струму характерні для електровоза з тиристорним перетворювачем (2ЕС5к).

Крім того, тип електровоза, скоріше схематичне рішення його електротягового привода, а також навантаження (значення I) впливають на кут зсуву фаз j між вхідними $u(t)$ і $i(t)$. Цікаво, що в електровозі ДСЗ кут j є від'ємним, тобто $u(t)$ відстає від $i(t)$ на 18° , 12° , 12° та 15° при відповідно $I \gg 10; 20; 50$ і 100 А. В електровозі 2ЕС5к, навпаки кут j додатний, $u(t)$ випереджає $i(t)$ на кут 42° , 18° , 18° та 27° відповідно зазначених вище величин I .

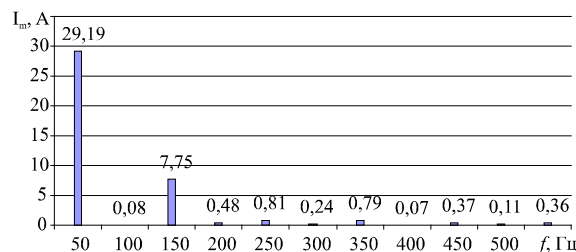
ДИСКРЕТНИЙ СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ

Результати якісного візуального вище наведеного аналізу осцилограм підтверджуються результатами числового гармонійного аналізу вхідних $u(t)$ і $i(t)$. На рис. 3 представлені дискретні частотні спектри тягового струму електровоза ДСЗ, що відповідають осцилограмам рис. 1, а на рис. 4 – спектри струму електровоза 2ЕС5к, що отримані для осцилограм рис. 2.

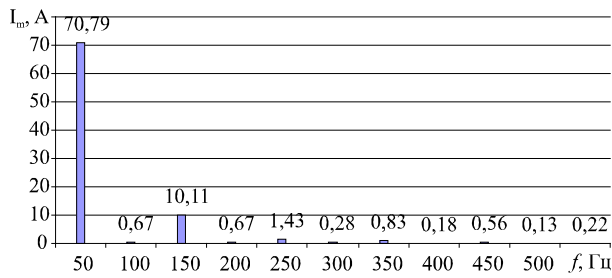
а)



б)



в)



Г)

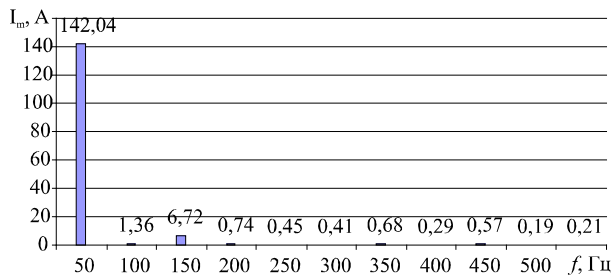
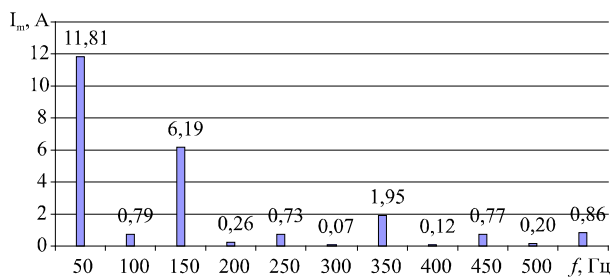
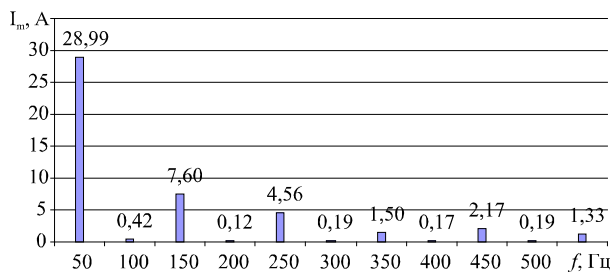


Рис. 3. – Дискретний спектральний аналіз електро-
воза ДСЗ при діючому значенні струму наванта-
ження: а) – 10А; б) – 20А; в) – 50А; г) – 100А

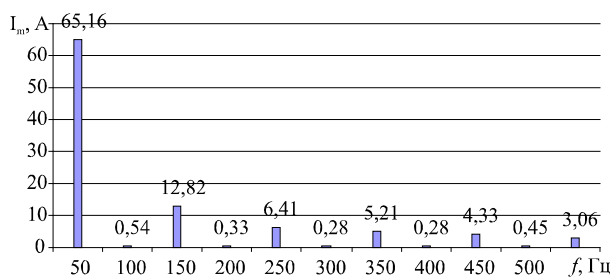
а)



б)



в)



г)

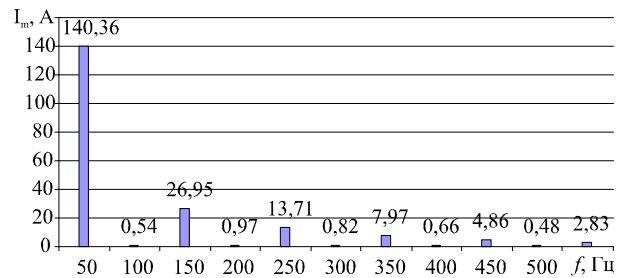


Рис. 4. – Дискретний спектральний аналіз електро-
воза 2ЕС5к при діючому значенні струму наванта-
ження: а) – 10А; б) – 20А; в) – 50А; г) – 100А

Як впливає із цих рисунків, основний внесок в спотворення кривої струму обох електро-
возів вносять непарні гармоніки, особливо 3-я, амплітуди яких різні для різних електро-
возів і різного електронавантаження. Зокрема, струм електро-
воза ДСЗ містить в основному гармоні-
ки 1, 3, 5, 7 і 9 (рис. 1.3), значення коефіцієнта n -ої гармоніки складової $K_{i(k)}$ яких, що визна-
чається (згідно з ГОСТ 13109-97) за формою

$$K_{i(k)} = \frac{I_{(k)}}{I_{(1)}} \cdot 100\% , \quad (2)$$

приведені в таблиці 1 при різних I .

Таблиця 1

Значення струму I , А	Коефіцієнт $K_{i(k)}$ (в %) гармонік			
	3	5	7	9
10,44	57,07	9,0	5,79	2,86
21,79	26,55	2,79	2,69	1,28
50,7	14,28	2,02	1,17	0,79
100,2	4,72	0,31	0,48	0,40

Ряд Фур'є струму електро-
воза 2ЕС5к має повільніше загасаючі амплітуди (рис.4): основ-
ний внесок в його несинусоїдність вносить більша кількість, ніж в ДСЗ, гармонік: з 1-ої по 3-
у (рис.4). Причому це характерно навіть при великому навантаженні ($I \gg 100$ А) (рис.4, з),
що також впливає із значень коефіцієнта $K_{i(k)}$ (таблиця 2)

Таблиця 2

Значення струму I , А	Коефіцієнт $K_{i(k)}$ (в %) гармонік						
	3	5	7	9	11	13	15
10,1	52,45	6,15	16,5	6,56	7,29	7,41	1,9
21,18	26,2	15,7	5,16	7,49	4,6	3,28	4,03
47,48	19,7	9,85	8,0	6,65	4,7	2,86	2,17
101,78	19,2	9,77	5,68	3,46	2,0	1,13	0,62

Значення інтегрального показника I_{THD} , що визначається за формулою (1), особливо великі для малих навантажень (~10 і 20 А) і приведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Тип електровоза	Значення I_{THD} (%) при I , А			
	10,1...10,5	21,2...21,8	48...50,7	100...101,8
ДСЗ	58,9	27,2	14,2	5,0
2ЕС5к	58,2	33,1	26,5	22,8

Початкові перших гармонік струму при $I \gg 10; 20; 50$ і 100 А відповідно складають: 47,06; 13,96; 15,45 і $12,89^\circ$ в електровозах ДСЗ; 58,23; 33,1; 25,47 і $22,8^\circ$ – в 2ЕС5к.

Максимально допустимі значення коефіцієнта $K_{i(k)}$ та інтегрального показника I_{THD} для систем і мереж з відношенням $I_{\text{к.з.}}/I_{\text{ном}} < 20$ відповідно складають [4]:

- $K_{i(k)}$: 4% при $k \leq 11$ і 2%, при $11 < k \leq 17$ (де k – номер гармоніки);
- I_{THD} : 5%; при відношенні $I_{\text{к.з.}}/I_{\text{ном}} = 20 \dots 50$ відповідно маємо: 7%, 7% і 8%.

Порівнюючи ці відсотки зі значеннями таблиці 1, таблиця 2 та таблиця 3 можна зробити висновок, що особливо при низьких електричних навантаженнях фактичні значення коефіцієнта $K_{i(k)}$ і показника I_{THD} суттєво перевищують максимально допустимі значення. Це відображається і в значеннях коефіцієнта потужності електровозів (особливо 2ЕС5к), які в межах $I \gg 10 \dots 100$ А складають 0,93...0,97 у електровозів ДСЗ і 0,69...0,86 – 2ЕС5к, що узгоджується з даними роботи [5].

ВИСНОВКИ

1. Первинна (вхідна) напруга, на відміну від струму, досліджених електровозів змінного струму являється синусоїдною, а основний вклад у спотворення струму вносять непарні гармоніки, особливо третя.

2. Кількість і величина амплітуд вищих гармонік в ряді Фур'є струму суттєво збільшується зі зменшенням електротягового навантаження електровоза.

3. Значення коефіцієнта k -ї гармонійної складової та інтегрального показника гармонійного складу струму при малих та середніх навантаженнях перевищують їх максимально допустимі значення.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хворост, Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития [Текст] / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Электротехника і Електромеханіка. – 2003. – № 4. – С.104-114
2. Сорин, Л.Н. Электровозы нового поколения и организация их разработки [Текст] / Л.Н. Сорин, В.П. Янов // Материалы Второго международного симпозиума «eltrans'2003», Санкт-Петербург. – 2003. – С.115-122
3. Босий, Д.О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму [Текст] / Д.О. Босий, В.Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. – 2009. – Ч.3. – С.86-89
4. Розанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии [Текст] / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, // Электротехника. – 1998. – № 5. – С.10-17
5. Міщенко, Т.М. Додаткові втрати електроенергії в тягових колах електровозів змінного струму [Текст] / Т.М. Міщенко // Материалы III международной научно-практической конференции «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», Воловец. – 2012. – С.53-55