

УДК 621.314.672

УЛУЧШЕНИЕ ФОРМЫ КРИВОЙ ТОКА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЗА СЧЁТ КОМБИНИРОВАНИЯ ТРЁХФАЗНЫХ И ОДНОФАЗНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

К. М. МЕДВЕДЕВ

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск*

Описание сущности вопроса

Обеспечение качества электрической энергии всегда являлось актуальной проблемой. Особое значение имеет часть этой проблемы, связанная с высшими гармониками (ВГ) тока и напряжения. Сложность выявления, расчёта, а также весьма широкий спектр производимых ими негативных воздействий на систему электроснабжения побуждает большое число исследователей к активному поиску решений проблем, связанных с высшими гармониками [1]–[3]. Резонансные и активные фильтры, всевозможные схемные и конструктивные решения, разработанные и используемые в настоящее время на предприятиях, позволяют значительно снизить содержание высших гармоник тока и напряжения в электрических сетях.

Однако, несмотря на это, актуальность проблемы ВГ в последние годы всё больше возрастает. Одной из причин является быстро растущее количество всевозможных бытовых (персональные компьютеры, телевизоры и т. д.), а также промышленных (преобразователи частоты) трёхфазных и однофазных электроприёмников, использующих в качестве источника питания нелинейный преобразователь – неуправляемый диодный выпрямитель (НВ), работающий на активную или активно-индуктивную нагрузку с параллельным ёмкостным фильтром в цепи выпрямленного тока (рис. 1).

Одной из особенностей работы таких преобразователей является потребление ими из сети сильно искажённого, импульсного тока, который для трёхфазных НВ к тому же часто является прерывистым (рис. 1).

Следует отметить, что кривая тока однофазного НВ будет всегда иметь форму одного импульса (рис. 1, б) и содержать в себе гармоники, кратные трём, только в случае схемы соединения обмоток питающего трансформатора «треугольник – звезда с нулём». Если питающий трансформатор будет иметь схему «звезда – звезда с нулём», то при равномерно распределённой между фазами однофазной нелинейной нагрузке входной ток выпрямителя не будет содержать кратных трём гармоник и его форма будет подобна форме тока трёхфазного НВ (рис. 1, а).

Однако в реальности равномерное распределение любой однофазной нагрузки редко может иметь место, и поэтому входной ток будет содержать определённый уровень кратных трём гармоник, который будет определяться степенью неравномерности распределения однофазных НВ между фазами. В этом случае форма тока может как быть похожей, так и отличаться от форм, показанных на рис. 1.

Если сложить кривые токов, изображённых на рис. 1, то получится ток, показанный на рис. 2, из которого видно, что суммарная кривая входных токов однофазного и трёхфазного НВ по форме стала несколько ближе к синусоидальной. Очевидно,

что относительное содержание высших гармоник в токе такой формы будет гораздо меньшим, чем в каждой кривой по отдельности.

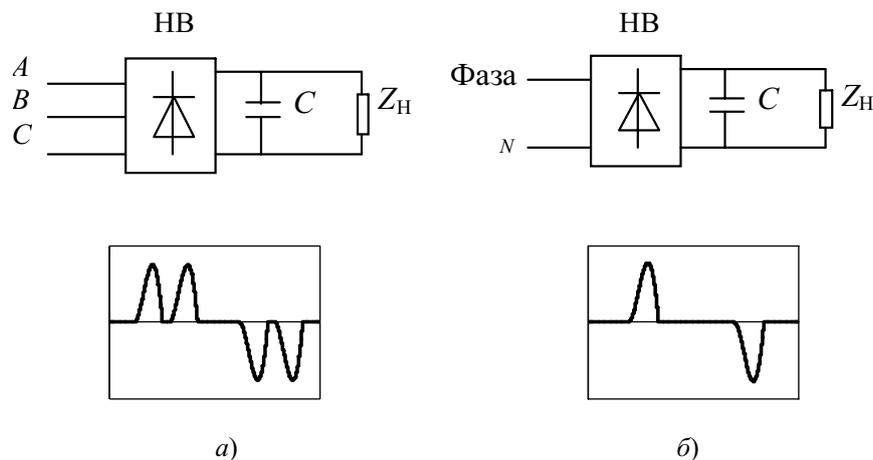


Рис. 1. Схемы и формы кривых входного тока трёхфазного (а) и однофазного (б) неуправляемого выпрямителя: C – ёмкость фильтра контура выпрямленного тока; $Z_{\text{н}}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки (активное или активно-индуктивное), представляющее собой питаемый выпрямителем электроприёмник (преобразователь частоты, компьютер и т. д.)

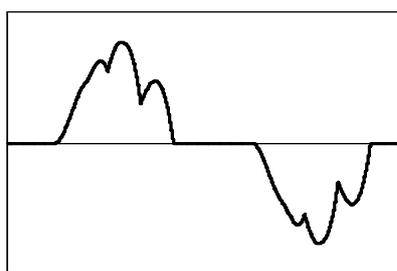


Рис. 2. Суммарная кривая входных токов трёхфазного и однофазного неуправляемых выпрямителей

Показанный эффект может быть использован в электрических сетях предприятий для снижения содержания высших гармоник в токе.

Для достижения максимального эффекта от снижения потерь мощности от токов высших гармоник и уменьшения искажения кривой питающего напряжения трёхфазную и однофазную выпрямительную нагрузку (например, преобразователи частоты) по возможности следует комбинировать исходя из следующих соображений:

1) питание однофазных и трёхфазных НВ должно осуществляться от одного трансформатора;

2) трёхфазные и однофазные нелинейные электроприёмники нужно группировать таким образом, чтобы точка их общего присоединения (шинопровод, распределительный шкаф или ящик) была как можно электрически ближе к месту их установки.

К примеру, от распределительного шкафа питаются несколько трёхфазных преобразователей частоты. Улучшить гармонический состав питающего шкафа тока можно заменой некоторого числа данных трёхфазных преобразователей на однофазные, питающиеся изначально от другого пункта распределения. Тогда кривая тока шкафа вместо своей исходной формы (рис. 1, а) будет иметь форму, показанную на рис. 2.

В итоге это приведёт к уменьшению содержания высших гармоник в токе распределительного шкафа, в результате чего снизятся потери мощности в питающем проводнике и трансформаторе, а также улучшится форма кривой питающего напряжения.

Также с целью обеспечения лучшего качества питающего напряжения для чувствительных электроприёмников (например, тех же персональных компьютеров) может быть целесообразным питание трёхфазных НВ от тех же трансформаторов, от которых питаются административные здания предприятий.

Такие организационные мероприятия могут быть относительно мало затратными и в итоге создавать как технический, так и экономический эффект, который будет ещё большим, если ещё на стадии проектирования предприятия распределять выпрямительную нагрузку соответствующим образом.

За рубежом в последние годы уделяют большое внимание возможности использования данного мероприятия как эффективного и относительно недорогого способа улучшения качества электроэнергии в электрических сетях, что отражено в литературе, в частности в [4].

В итоге можно сформулировать цели данной статьи:

- кроме чисто визуального, интуитивного наблюдения эффекта от суммирования кривых токов однофазного и трёхфазного НВ (рис. 2) проведение также исследования физических причин снижения гармоник рассмотренным способом посредством анализа взаимодействия амплитуд и фаз отдельных гармоник в кривых тока трёхфазного и однофазного преобразователей;

- определение соотношения мощностей трёхфазной и однофазной группируемых нелинейных нагрузок, при котором достигается максимальный эффект по снижению уровня высших гармоник тока.

Методика проведения исследований

В эксперименте в качестве нелинейной нагрузки использовались трёхфазные и однофазные преобразователи частоты (ПЧ) относительно небольшой мощности. На рис. 3 приведена схема эксперимента, на которой трёхфазный и однофазный ПЧ питаются от трансформатора мощностью 1000 кВА 10/0,4 кВ с наиболее часто применяемой на предприятиях схемой соединения обмоток «треугольник – звезда с нулём». Питающая сеть симметрична. Точкой общего присоединения ПЧ является распределительный шкаф ШР.

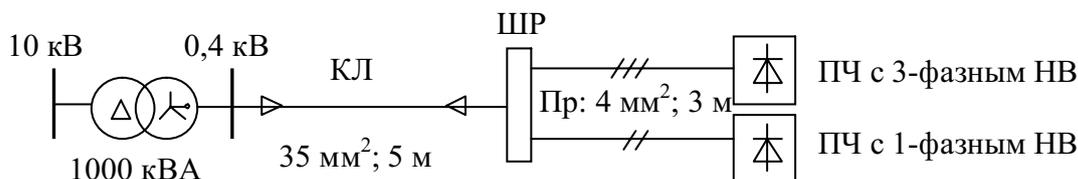


Рис. 3. Схема эксперимента: КЛ – питающий кабель; ШР – распределительный шкаф; Пр – провода, питающие ПЧ

Исследования проводились в следующем порядке:

1. С помощью математической модели, разработанной и описанной в [5], проводилось моделирование кривых входных токов трёхфазного и однофазного ПЧ для номинального режима работы. Причём номинальная мощность АД, питаемого от ПЧ с трёхфазным НВ, была принята 7,5 кВт и не изменялась в процессе эксперимента. Номинальные мощности АД, питаемые от ПЧ с однофазным НВ, изменялись и были приняты из стандартного ряда для АД серии 4А: 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5 кВт. Мгновенные значения полученных кривых токов суммировались.

2. Проводился гармонический анализ кривых входных токов трёхфазного и однофазного ПЧ, а также их суммарного тока с определением действующих значений токов высших гармоник и их фазовых углов.

Исследования проводились в предположении отсутствия у трёхфазных и однофазных ПЧ сетевых дросселей и дросселей контура выпрямленного тока. Это позволит получить более наглядные зависимости, которые при установке дополнительных индуктивностей в цепи ПЧ будут выражены слабее.

Результаты эксперимента

При представлении результатов исследований использовались следующие обозначения величин:

1) $I_{(k)}$, % – относительное значение тока k -й гармоники, определяемое по выражению (1):

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

где $I_{(k)}$, A – значение тока k -й гармоники в амперах; $I_{(1)}$, A – значение тока 1-й гармоники в амперах;

2) $K_{г.т}$ – коэффициент гармоник тока, определяемый по выражению (2):

$$K_{г.т} = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2}}{I} \cdot 100, \quad (2)$$

где I – полный ток в амперах;

3) $P_{Н1ф}$ – номинальная мощность АД, питаемого от ПЧ с однофазным НВ, кВт;

4) $P_{Н3ф}$ – номинальная мощность АД, питаемого от ПЧ с трёхфазным НВ, кВт;

5) $P_{н}^*$ – отношение номинальной мощности АД, питаемого от ПЧ с однофазным НВ, к номинальной мощности АД, питаемого от ПЧ с трёхфазным НВ, в %-х:

$$P_{н}^* = \frac{P_{Н1ф}}{P_{Н3ф}} \cdot 100. \quad (3)$$

На рис. 4 приведены зависимости гармонического состава входного тока ПЧ с однофазным НВ от величины $P_{Н1ф}$.

На рис. 5 приведены зависимости гармонического состава суммарного тока ПЧ с однофазным и трёхфазным НВ в зависимости от величины $P_{н}^*$. При значении $P_{н}^* = 0$ (1-я точка на оси X), по рис. 5 можно проследить гармонический состав входного тока ПЧ с трёхфазным НВ и принятой мощностью АД 7,5 кВт.

Для удобства наблюдения результатов на рис. 5 изображены две оси X . На одной даны значения $P_{н}^*$, а на другой – соответствующая данному $P_{н}^*$ величина $P_{Н1ф}$.

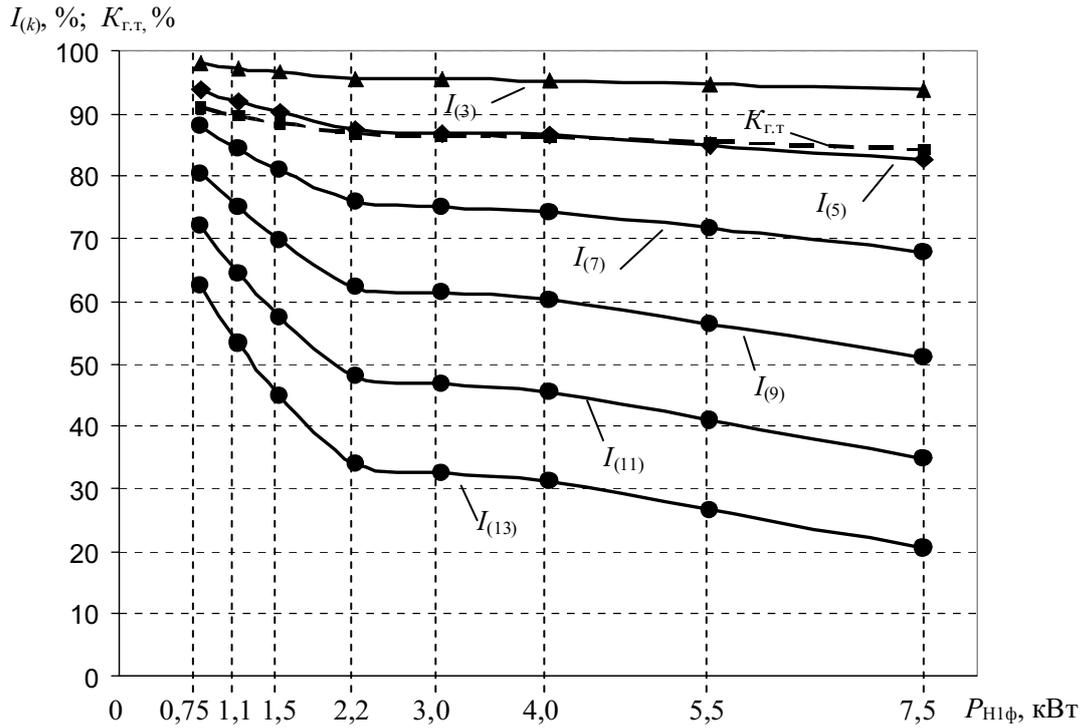


Рис. 4. Зависимость гармонического состава входного тока ПЧ с однофазным НВ от номинальной мощности питаемого АД

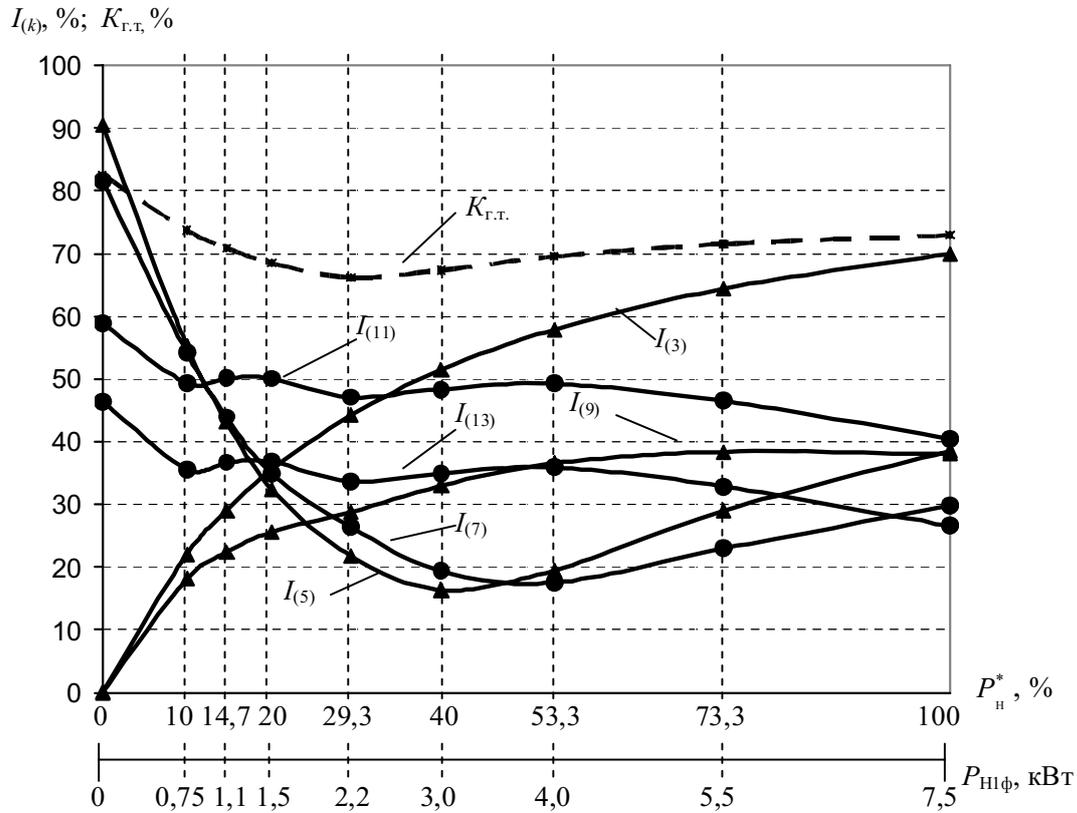


Рис. 5. Зависимость гармонического состава суммарного тока ПЧ с однофазным и трёхфазным НВ от отношения номинальных мощностей питаемых АД

На рис. 6 приведены векторные диаграммы, поясняющие с точки зрения физики процессов эффект снижения содержания высших гармоник в суммарном токе ПЧ с однофазным и трёхфазным НВ.

На данном рисунке сплошной вектор с более жирной стрелкой представляет собой ток 5-й и 7-й гармоник ПЧ с трёхфазным НВ и АД принятой номинальной мощности 7,5 кВт. Вектора со сплошной линией и стрелкой меньшего размера – токи 5-й и 7-й гармоник ПЧ с однофазным НВ для различных значений величины P_H^* .

Вектора, представляющие собой суммарные токи, обозначены прерывистой линией. Возле каждого вектора суммарного тока стоит значение величины параметра P_H^* .

Вектора токов изображены в амперах в масштабе 4,85 А/см.

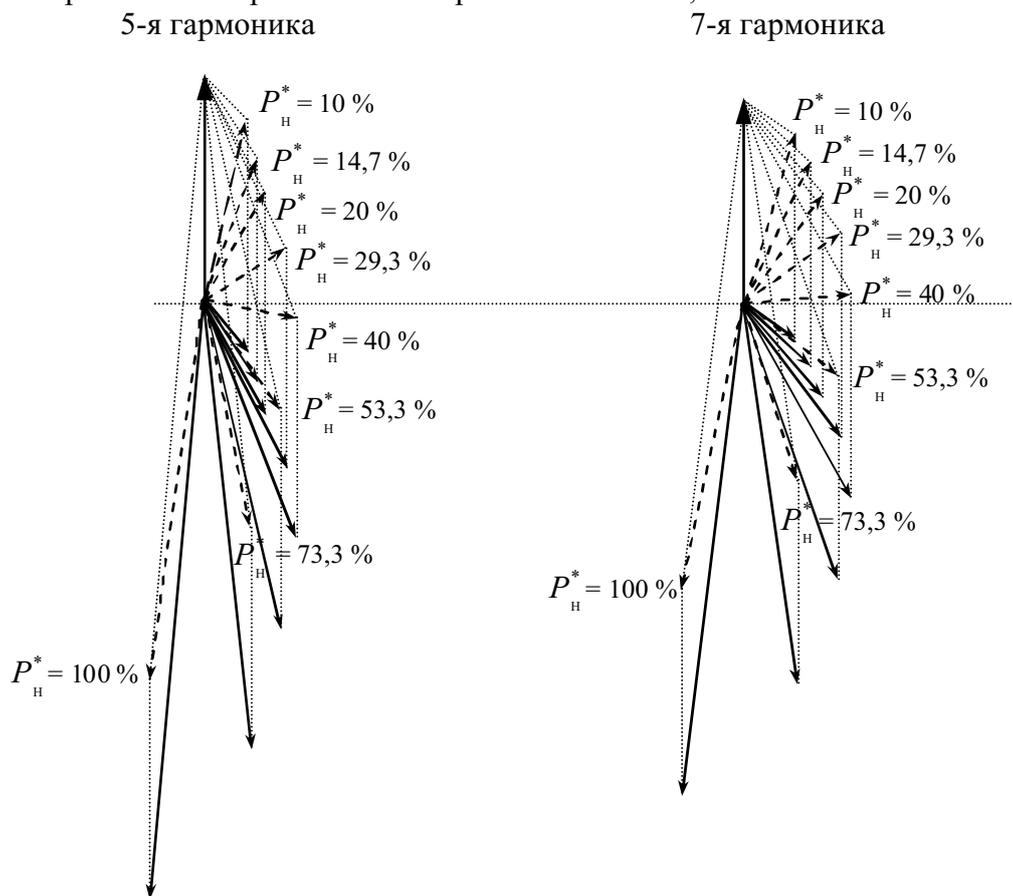


Рис. 6. Векторные диаграммы для 5-й и 7-й гармоник входных токов ПЧ с однофазным и трёхфазным НВ, а также их суммарного тока

Выводы

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Комбинирование трёхфазных и однофазных нелинейных преобразователей может существенно снизить относительное содержание высших гармоник в их суммарном токе.

2. Из рис. 4 и 5 видно, что содержание высших гармоник во входных токах трёхфазных и однофазных ПЧ при условии отсутствия в цепи дополнительных индуктивностей (дросселей) весьма велико.

3. Из рис. 5 видно, что добавление к ПЧ с трёхфазным неуправляемым выпрямителем ПЧ с однофазным НВ приводит к резкому снижению уровня характерных не-

чётных высших гармоник в суммарном токе. Видно, что в основном эффект проявляется за счёт 5-й и 7-й гармоник.

Для конкретного рассмотренного в эксперименте случая максимальное снижение уровня 5-й гармоники в суммарном токе достигается при мощности АД, питающегося от ПЧ с однофазным НВ, равной 40 % от мощности АД, питающегося от ПЧ с трёхфазным НВ (т. е. при $P_n^* = 40\%$). Для 7-й гармоники максимальное снижение её уровня достигается при $P_n^* = 53,3\%$.

Однако общий эффект необходимо оценивать не по отдельным гармоникам, а по коэффициенту гармоник тока $K_{г.т}$, который включает в себя все высшие гармоники, в том числе и кратные трём, доля которых в суммарном токе возрастает с увеличением P_n^* , т. е. с ростом мощности однофазного ПЧ. Из рис. 5 видно, что минимальное значение $K_{г.т}$ принимает при $P_n^* = 30 \div 35\%$.

На основании сказанного выше можно сделать вывод о том, что максимальный эффект по снижению уровня высших гармоник будет наблюдаться тогда, когда мощность однофазного ПЧ будет составлять приблизительно третью часть от мощности трёхфазного ПЧ.

4. Объяснение эффекта снижения уровней 5-й и 7-й гармоник суммарного тока можно видеть из векторных диаграмм на рис. 6.

С увеличением мощности ПЧ с однофазным НВ возрастает величина 5-й (7-й) гармоники его входного тока, вместе с чем увеличивается и угол между вектором данного тока и вектором тока 5-й (7-й) гармоники ПЧ с трёхфазным НВ. Поэтому длина вектора суммарного тока сначала уменьшается, а затем снова возрастает. Отсюда следует, что при определённых значениях величины P_n^* длины векторов суммарного тока будут минимальными, что и можно увидеть на векторных диаграммах на рис. 6.

Литература

1. Арриллага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер; пер. с англ. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.: ил.
2. Arrillaga J., Watson N.R. Power system harmonics. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
3. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.: ил.
4. Steffan Hansen, Peter Nielsen, Frede Blaabjerg. Harmonic cancellation by mixing nonlinear single-phase and three-phase loads // IEEE Transactions on industry applications, vol. 36, № 1, January / February 2000.
5. Фираго, Б. И. Анализ входных токов системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» при несимметрии питающего напряжения / Б. И. Фираго, К. М. Медведев // Энергетика. Известия вузов. – 2006. – № 1. – С. 8–14.

Получено 13.02.2006 г.