

Айдарова А.Р., Байбагысова Д.Ж., Кадиева А.К.

**ИНТЕРГАРМОНИКАНЫН ТАРМАКТЫН БҮТҮМДҮГҮН
БӨЛҮКЧӨЛӨРҮНӨ ЖАНА АБА ЛИНИЯЛАРЫНДА ЭЛЕКТР ӨТКӨРГҮЧ
ЭЛЕКТР ЖОГОТУУЛАР ТААСИРИН ИЗИЛДӨӨ**

Айдарова А.Р., Байбагысова Д.Ж., Кадиева А.К.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕРГАРМОНИКИ НА
СЕТЕВУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ ЧАСТОТЫ И ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
В ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

A.R. Aidarova, D.Zh. Baibagysova, A.K. Kadieva

**A STUDY OF THE IMPACT INFLUENCE OF INTERHARMONICS
ON THE POWER FREQUENCY COMPONENT AND LOSS OF THE
ELECTRIC POWER IN OVERHEAD POWER**

УДК: 621.311

Таблица 1.

Макалда виртуалдык аспапты колдонуу каралат. Ал LabView алкагында, интергармоника пайда болгондо аба линияларында кошумча чыгымдарды эсептөө эксперименттин өткөрүү үчүн иштелип чыккан. Интергармониканын тармактын бүтүмдүгүн бөлүкчөлөрүнө таасирин изилдөө.

Негизги сөздөр: интергармоника, гармоника, виртуалдык аспап, тармактын бүтүмдүгүнүн бөлүкчөлөрү, LabView, электроэнергиянын кошумча чыгымдары.

В статье рассматривается использование виртуального прибора, разработанного в среде LabView, для проведения численного эксперимента для оценки дополнительных потерь в воздушной линии при возникновении интергармоник. Исследование влияния интергармоник на сетевую составляющую частоты.

Ключевые слова: интергармоника, гармоника, виртуальный прибор, сетевая составляющая частоты, LabView, дополнительные потери электроэнергии.

This article discusses the use of virtual instrument developed in the LabView Environment to conduct numerical experiments to assess additional losses in overhead line in case of interharmonics. Study the impact of interharmonics on the power frequency component.

Key words: interharmonics, harmonics, virtual instrument, power frequency component, LabView, additional electricity losses.

Введение. По мнению автора [1], на сегодняшний день в условиях роста различных мощных нелинейных нагрузок анализ качества электроэнергии без учета влияния **интергармоник** (ИГ) на уровни ЭМС в промышленных электрических сетях является неполным.

Согласно стандарту Международной электротехнической комиссии (МЭК) и документу рабочей группы IEEE, интергармоники представляют собой гармонические колебания с частотами, некратными частоте питающей сети [2].

В амплитудно-частотном спектре ИГ находятся между каноническими, т.е. высшими гармониками (ВГ), включая основную, а также между постоянной составляющей и основной гармоникой. В таблице 1 представлены их математические определения [3].

Спектральные составляющие волны (частоты f)

Гармоника	$f = n f_1, \text{ где } n \in \mathbb{Z}, n > 0$
Компонента постоянного тока	$f = n f_1, \text{ где } n = 0$
Интергармоника	$f \neq n f_1, \text{ где } n \in \mathbb{Z}, n > 0$
Субгармоника	$f > 0 \text{ Гц и } f < f_1$
f_1 – основная частота напряжения	

Возникновение ИГ в ряде случаев обусловлено такими потребителями как электродуговые сталеплавильные печи, сварочные установки, статические преобразователи частоты и др. Эти процессы носят случайный характер, поэтому интергармоники нестабильны по частоте и амплитуде [4].

Преобразователи частоты (ПЧ), широко применяемые в металлургии, машиностроении, на предприятиях лёгкой промышленности, также являются источниками ИГ. На рисунке 1 представлена структурная схема ПЧ со звеном постоянного тока. ПЧ состоит из выпрямителя **В**, инвертора **И** (как правило, инвертора напряжения) и индуктивно-емкостного фильтра [5].

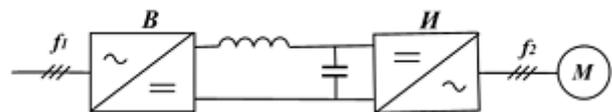


Рис. 1. Преобразователь частоты со звеном постоянного тока.

Спектральный состав входного (сетевое) тока может быть определён по формуле [6]:

$$f_{из} = |(p_1 m \pm 1) f_1 \pm n p_2 f_2|, \quad (1)$$

где $f_{из}$ – частота интергармоник, Гц;

p_1, p_2 – пульсность выпрямителя и инвертора;

m – целое положительное число, включая ноль (0, 1, 2...);

n – целое положительное число (1, 2, 3...);

f_1, f_2 – частоты выпрямителя и инвертора, Гц.

Функция входного тока, содержащего ИГ, может быть представлена в виде [6]:

$$i(t) = \sqrt{2}I_m[\sin(2\pi f_1 t)$$

$$+ m_1 \sin(2\pi f_{u21} t + \varphi_1) + m_2 \sin(2\pi f_{u22} t + \varphi_2)], \quad (2)$$

где I_m – амплитудное значение тока, А; m_1, m_2 – относительные значения амплитуд пары ИГ; f_{u21}, f_{u22} – частоты интергармоник, полученные по формуле (1).

Для получения наиболее достоверной информации о всех составляющих потерь и причинах их появления в ВЛ, необходимо проведение натурного эксперимента в реальных электрических сетях в управляемых и контролируемых условиях. Однако, проведение такого эксперимента невозможно, так как исследователь не имеет возможности вмешиваться в производственный процесс и управлять режимами работы сети по своему желанию в соответствии с поставленными задачами исследования. Поэтому исследуемый объект заменяют компьютерной моделью и изучают ее поведение при различных внешних воздействиях. Часто такой подход значительно дешевле и доступнее натурного эксперимента, его выполнение требует меньшего времени и он дает более подробную информацию о величинах, интересующих исследователя.

Постановка задачи. Используя виртуальный прибор (ВП), разработанный в среде **LabView**, проведем численный эксперимент по оценке дополнительных потерь в ВЛ (рис. 2) при возникновении интергармоник.

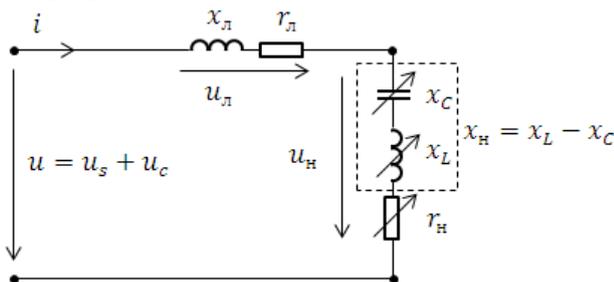


Рис. 2. Передача энергии от источника напряжением u к нагрузке.

Обозначим комплексные сопротивления провода линии (для ВЛ до 35кВ) и нагрузки соответственно через:

$$Z_L = r_L + jx_L, \quad Z_H = r_H + jx_H \quad (3)$$

Полная мощность на зажимах нагрузки [7]:

$$S = z_H I^2 = \frac{z_H U^2}{|Z_L + Z_H|^2} = \frac{z_H U^2}{|Z_L (1 + \frac{z_H}{z_L})|^2} = \frac{z_H U^2}{|Z_L|^2 |1 + \frac{z_H}{z_L}|^2} = \frac{z_H U^2}{z_L^2 |1 + \frac{z_H}{z_L}|^2} = \left(\frac{U}{z_L}\right)^2 \frac{z_H}{|1 + \frac{z_H}{z_L} e^{j(\varphi_H - \varphi_L)}|^2}, \quad (4)$$

Для реализации компьютерного моделирования потери мощности в проводах линии знаменатель в выражении (4) целесообразно преобразовать в более простой вид:

$$\left| \left(1 + \frac{z_H}{z_L} e^{j(\varphi_H - \varphi_L)} \right) \right|^2 = \left| 1 + 2 \frac{z_H}{z_L} e^{j(\varphi_H - \varphi_L)} + \left(\frac{z_H}{z_L}\right)^2 e^{2j(\varphi_H - \varphi_L)} \right|^2 = 1 + 2 \frac{z_H}{z_L} \cos(\varphi_H - \varphi_L) + \left(\frac{z_H}{z_L}\right)^2. \quad (5)$$

Подставив полученное значение (5) в выражение (4), окончательно имеем

$$S = \left(\frac{U}{z_L}\right)^2 \frac{z_H}{1 + 2 \frac{z_H}{z_L} \cos(\varphi_H - \varphi_L) + \left(\frac{z_H}{z_L}\right)^2}, \quad (6)$$

Подставив (6) в формулу $S = z_H I^2$, определим:

$$I^2 = \left(\frac{U}{z_L}\right)^2 \frac{1}{1 + 2 \frac{z_H}{z_L} \cos(\varphi_H - \varphi_L) + \left(\frac{z_H}{z_L}\right)^2}$$

Следовательно, активная мощность, которая теряется в проводах линии, равна

$$P = r_L I^2 = \left(\frac{U}{z_L}\right)^2 \frac{r_L}{1 + 2 \frac{z_H}{z_L} \cos(\varphi_H - \varphi_L) + \left(\frac{z_H}{z_L}\right)^2}, \quad (7)$$

где

$$z_L = \sqrt{r_L^2 + x_L^2}, \quad z_H = \sqrt{r_H^2 + x_H^2}, \quad \varphi_L = \arctg \frac{x_L}{r_L} \quad \text{и} \\ \varphi_H = \arctg \frac{x_H}{r_H}.$$

На рисунках 3 и 4 соответственно приведены лицевая панель и блок-диаграмма используемого ВП.

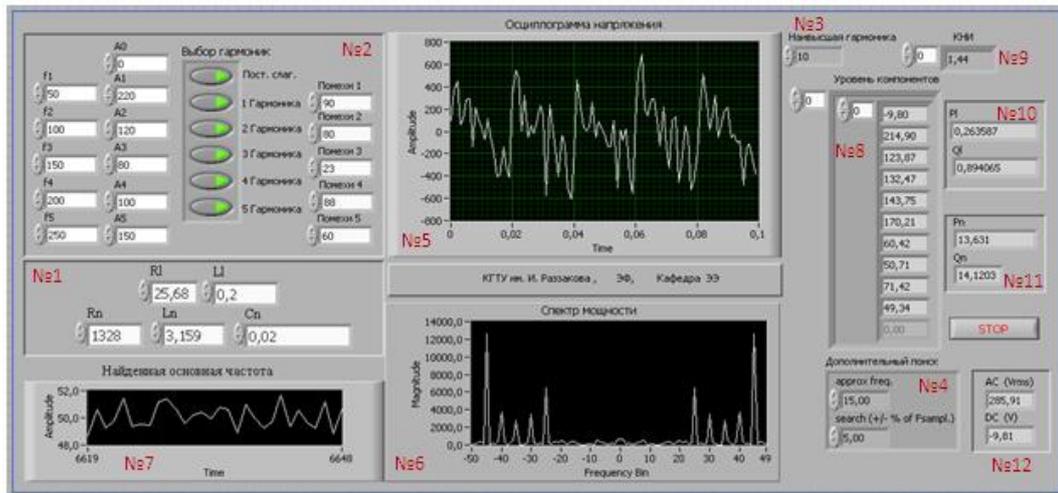


Рис. 3. Передняя панель ВП.

На рисунке 3, под номерами: №1, №2 – терминалы элементов управления, представляющие порты ввода информации в блок-диаграмму: №1 – для ввода параметров ВЛ и нагрузки; №2 – содержит элементы ввода параметров источника питания и элементы управления в виде кнопок, предназначенных для подключения имитаторов хаотических сигналов; №3 – задает используемую для гармонического анализа гармонику (включая основную тон), например, для анализа по десяти гармоникам на входе устанавливается значение 10; №4 – на входе «дополнительный поиск» задается частотный диапазон; №5 – экран виртуального осциллографа, куда выводится информация о функциональной зависимости сигнала $u(t)$ (3); №6, №7 – высвечиваются соответственно спектр мощности (спектральный состав сигнала $u(t)$) и зависимость частоты основной ведущей гармоники; №8 – «уровень компонентов»: выдается массив амплитуд измеренных гармоник в вольтах при условии, что входной сигнал тоже задается в вольтах; №9 – выдается значение КНИ в интервале до высшей гармоники; №10, №11 – информация соответственно о потерях в ВЛ и нагрузке.

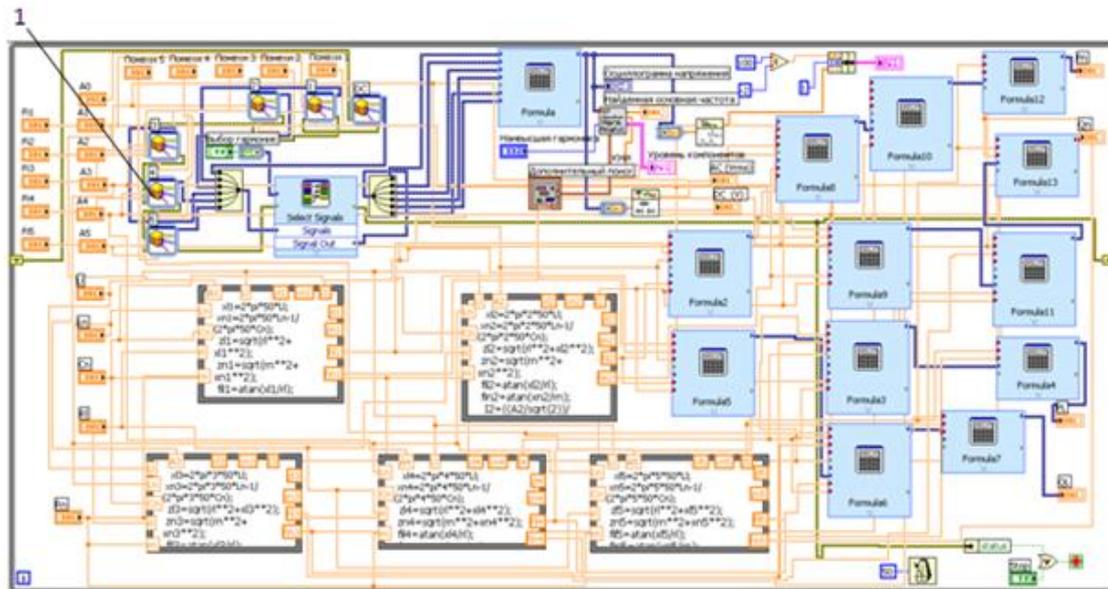


Рис. 4. Блок-диаграмма ВП; 1– генератор гармоник или интергармоник.

Порядок выполнения анализа.

5. Ввод параметров ВЛ и нагрузки.
6. Ввод параметров источника питания (амплитуды и частоты гармоник или интергармоник, амплитуды хаотических составляющих соответствующих гармоник; с помощи кнопок определяются

гармоники участвующие в формировании общего сигнала (напряжение, действующее на входе электрической цепи).

7. Задание значения номера наивысшей гармоники, используемого для гармонического анализа.

8. Пуск ВП и анализ полученных результатов численного эксперимента с помощью ВП.

Пуск ВП осуществляется нажатием кнопки в виде стрелки, расположенной сверху



Прекращение работы ВП осуществляется нажатием кнопки «STOP», расположенной на передней панели ВП.

Тестирование виртуального прибора и анализ результатов численного эксперимента.

Проверку работоспособности ВП проведем при следующих исходных данных: Параметры провода ВЛ и нагрузки ($R_1 = 25,68 \text{ Ом}$, $L_1 = 0,002 \text{ Гн}$, $R_2 = 1323 \text{ Ом}$, $L_2 = 3,16 \text{ Гн}$, $C_2 = 0,002 \text{ Ф}$).

Поставим эксперимент при заданных исходных данных и при искаженной синусоидальности сигнала. Предположим, что в результате искажения возникли пять гармоник с параметрами:

$$f_1 = 50 \text{ Гц}, A_1 = 49,5 \text{ кВ};$$

$$f_2 = 100 \text{ Гц}, A_2 = 39,6 \text{ кВ};$$

$$f_3 = 150 \text{ Гц}, A_3 = 44,55 \text{ кВ};$$

$$f_4 = 200 \text{ Гц}, A_4 = 14,85 \text{ кВ};$$

$$f_5 = 250 \text{ Гц}, A_5 = 24,75 \text{ кВ}.$$

Результаты эксперимента.

Потери в ВЛ: $P_1 = 0,0175599 \cdot 10^3 \text{ кВт}$, при потребленной нагрузкой активной мощности, равной $P_2 = 0,904664 \cdot 10^3 \text{ кВт}$.

Продолжим эксперимент при другом составе гармоник.

Проведем настройку ВП, чтобы изменить состав гармоник, т.е. наряду с каноническими гармониками $f_1 = 50 \text{ Гц}$, $f_2 = 150 \text{ Гц}$, $f_4 = 200 \text{ Гц}$, амплитудами соответственно равными $A_1 = 49,5 \text{ кВ}$, $A_2 = 44,55 \text{ кВ}$, $A_4 = 14,85 \text{ кВ}$, введем следующие интергармоники, частоты которых равны $f_{12} = 70 \text{ Гц}$ и $f_{15} = 430 \text{ Гц}$, а амплитуды $A_{12} = 39,6 \text{ кВ}$, $A_{15} = 24,75 \text{ кВ}$, и включим прибор.

Результаты эксперимента.

Потери $P_1 = 0,0192437 \cdot 10^3 \text{ кВт}$. Следовательно, потери в ВЛ увеличились на $(0,0192437 - 0,0175599) \cdot 10^3 = 0,0016838 \cdot 10^3 \text{ кВт}$, что дает 9,59% увеличение потери по сравнению с вариантом, когда интергармоники отсутствовали.

Увеличение потерь можно объяснить тем, что появление интергармоник привело к увеличению значения амплитуды основной (первой) гармоники. Амплитуда $A_1 = 49,5 \text{ кВ}$ до изменения и $A_1 = 55,57 \text{ кВ}$ после. Осциллограмма сигнала (напряжения), спектральный состав и сетевая составляющая частоты (ССЧ) в разные моменты времени представлены на рисунке 5 *a, b, c, d*.

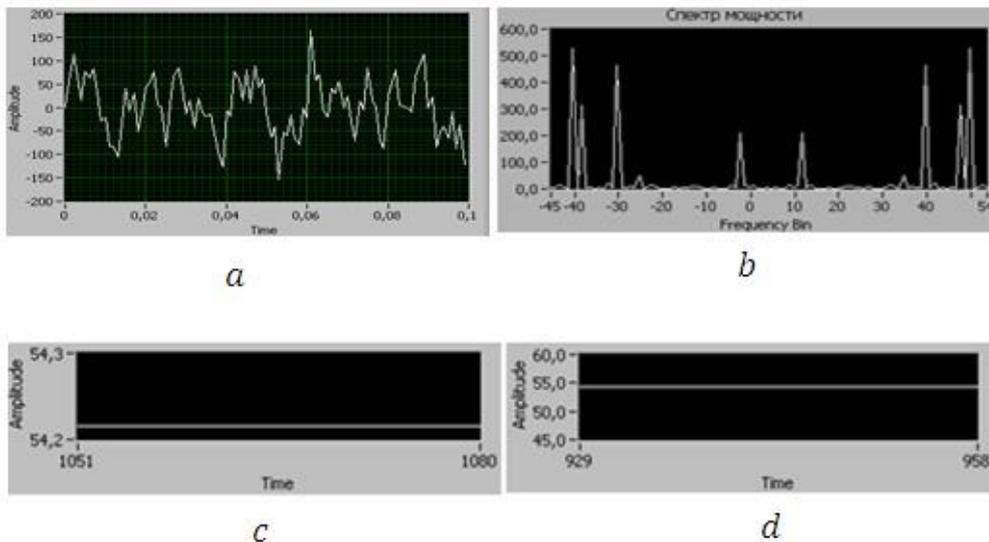


Рис. 5. Результаты численного эксперимента при наличии интергармоник в составе сигнала: *a* – осциллограмма напряжения; *b* – спектральный состав сигнала; *c, d* – частота сети в разные моменты времени

Следует отметить, что в ходе эксперимента мы наблюдали, что значение ССЧ в случайные моменты времени от одного значения 54,22 Гц (рис. 5, *c*) скачкообразно принимало другое значение приблизительно 55 Гц, после опять в случайный момент времени возвращался в прежнее положение и так далее.

Осциллограмма напряжения сильно искажена (рис. 5, *a*).

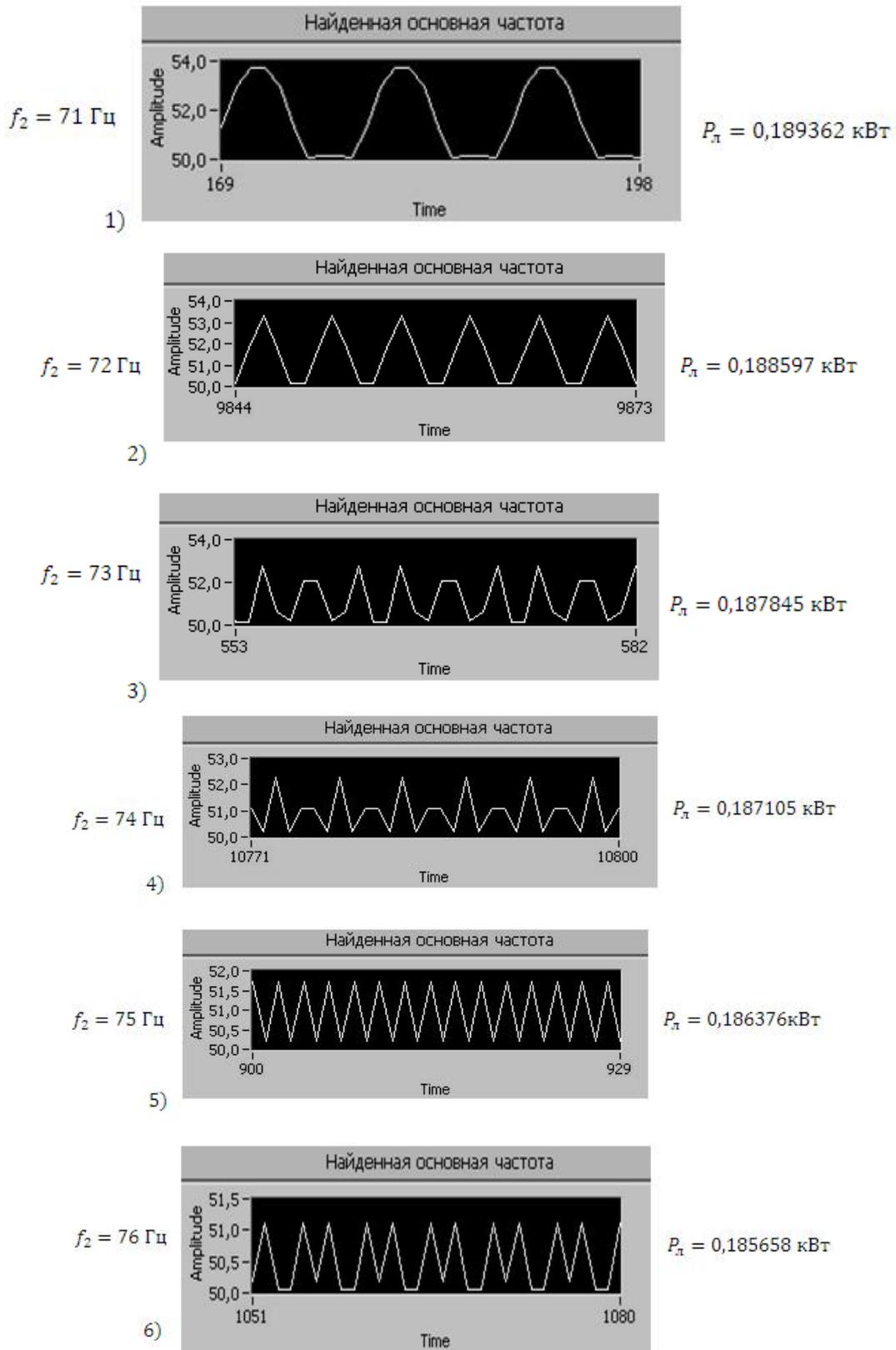
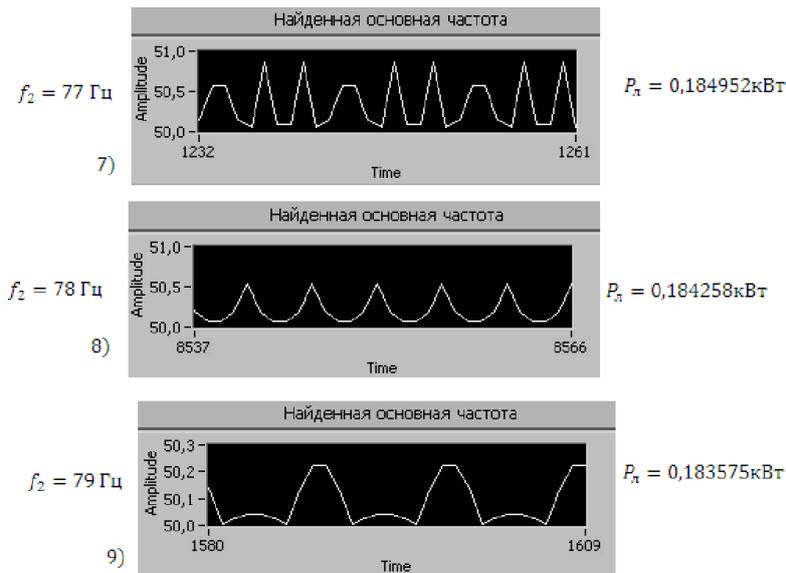


Рис. 6. Результаты численного эксперимента при наличии в составе сигнала интергармоник с частотами 71, 72, 73, 74, 75, 76 Гц, справа приведены потери в ВЛ.



Продолжение рис. 6. Интергармоники с частотами: 77, 78, 79 Гц, справа приведены потери в ВЛ.

При дальнейшем продолжении численного эксперимента для других интергармонических составляющих мы наблюдали довольно «странное» изменение ССЧ по времени.

Например, при увеличении частоты интергармоники с 70 Гц до 71 Гц (всего лишь на 1 Гц), ССЧ изменяется так, как показано на рис.6 (1), т.е. детерминировано периодически возрастает и убывает в пределах приблизительно от 50,1 до 53,8 Гц.

Замечено, что дальнейшее увеличение частоты интергармоники каждый раз на единицу приводит, во-первых, к скачкообразно - качественному изменению формы графической зависимости ССЧ с постепенным уменьшением их амплитуд; во вторых, при постепенном уменьшении амплитуды сохраняется, что важно отметить, закономерное скачкообразно - качественное изменение формы; в третьих, при приближении значения частоты интергармоники к ближайшей канонической, амплитуда частоты сжимается почти до нуля, сохраняя свои формы, а при достижении канонического значения, частота стабилизируется, принимая значения частоты первой гармоники, т.е. 50 Гц.

Заключение. В результате появления интергармоник, сетевая составляющая частоты не постоянна, а изменяется «странным» образом: график изменяется от одной формы к другой в зависимости от конкретного значения частоты интергармоники, что в результате приводит к увеличению потерь.

Для объяснения закономерностей чередования форм графиков (рис. 5) требуются отдельные исследования.

Литература:

1. Гапиров Р.А., Осипов Д.С. Нормирование интергармоник как показателя качества электроэнергии в России и за рубежом//Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.; URL: [http:// www. science-education.ru/ru/article/view?id=15253](http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15253).
2. Жежеленко И.В. Причины появления интергармоник, генерируемых непосредственными преобразователями частоты, и подход к их нормированию / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко // Вісник ПДТУ. – Маріуполь, 2004. – №14.(13)
3. Hanzelka Z., Bien A. “Power Quality Application Guide. Interharmonics 3.1.1”, Leonardo Power Quality Initiative, July 2004.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 5-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 358 с.
5. Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко // Электрика, 2008. – № 10. – С. 3-11.
6. Yong J. Characterizing voltage fluctuations caused by a pair of interharmonics/ Yong J., Tayjasant T., Xu W., Sun C.//IEEE Transactions of power delivery. Vol.23. No. 1. January 2008. P. 319-327.
7. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, ч.1, Линейные электрические цепи, изд. 4-е. - М.: Энергия, 1970. - 592 с. с илл.

Рецензент: д.т.н., доцент Бакасова А.Б.