

ПРОГРАММА ДЛЯ АНАЛИЗА ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Бекиров Э.А., Асанов М.М., Поляновский Д.В.

Физико-технический институт ФГАОУ ВО
«Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»,
Адрес: г. Симферополь, ул. Киевская, 181
E-mail: kaf_energo@cfuv.ru

Аннотация. В работе проанализировано влияние несинусоидальности напряжения и тока на работу электрооборудования. Показаны основные виды воздействий, которые оказывают гармоники на электроустановки. Отмечена возрастающая роль математического моделирования и алгоритмизации в исследовании качества электроэнергии. Разработан алгоритм и программа, позволяющая определять параметры гармонического сигнала. Сигнал может быть выбран из базы данных программы, задан таблицей или в виде графика, нарисованного от руки. Вывод результатов вычислений происходит с помощью инструментов TextBox.

Ключевые слова: алгоритм, анализ, коэффициенты высших гармоник, математическая модель

ВВЕДЕНИЕ

Под качеством электроэнергии понимают степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей качества электроэнергии [1].

Нормы и показатели качества электроэнергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения устанавливаются соответствующими стандартами [1 – 3].

Несинусоидальность напряжений и токов негативным образом сказывается на качестве электроэнергии. Причиной искажений кривых напряжений и токов является наличие в электрической сети нелинейных нагрузок, которые становятся источниками гармонических токов. При прохождении гармонических токов возникает гармоническое напряжение через сопротивление сети, соответственно, вызывая искажение напряжения питания. Примером нелинейных нагрузок являются нагрузки, в которых используется силовая электроника, количество которых непрерывно увеличивается. Среди видов воздействий, которые оказывают гармоники на электроустановки, выделяют следующие:

- увеличение потерь в проводниках, электрических машинах, конденсаторах;
- снижение рабочих параметров оборудования;
- возмущающее воздействие на чувствительные нагрузки (регулирующие устройства, компьютерное оборудование, устройства контроля и управления);
- экономические потери, в том числе, сокращение срока службы оборудования, ложное срабатывание и отключение электроустановок [4].

Количественными оценками несинусоидальности, допустимые значения

которых регламентируются стандартами, являются суммарный коэффициент гармонических составляющих и коэффициент n -й гармонической составляющей [5].

Для измерения гармонического состава напряжения могут быть использованы два метода: гармонический анализ осциллограмм напряжения и аппаратный анализ, основанный на применении различных анализаторов.

Гармонические составляющие можно измерять поочередно или одновременно: первый способ анализа называется последовательным, а второй – параллельным.

Аппаратурный анализ спектра может производиться различными методами. Наиболее распространенные из них:

- 1) метод избирательных систем;
- 2) метод биений;
- 3) гетеродинный метод.

По первому методу спектр исследуемого напряжения последовательно или параллельно расщепляется избирательной системой на отдельные гармонические составляющие, которые затем измеряются. В качестве избирательных систем используются пассивные и активные фильтры.

Сущность метода биений сводится к наблюдению интерференции двух близких по частоте колебаний, одно из которых представляет собой неизвестную составляющую исследуемого напряжения, а другое – напряжение измерительного генератора. Когда разность между частотами указанных напряжений равна долям периода, стрелка измерительного прибора отклонится. Чем меньше эта разность, тем больше отклонение стрелки.

Гетеродинный метод анализа основан на преобразовании напряжения исследуемой частоты в напряжение другой постоянной частоты, на которую настроена избирательная система. Определение частоты составляющей

исследуемого напряжения производится по частоте генератора (гетеродина), которая требуется для указанного преобразования.

Определение составляющих высших гармоник при несинусоидальных напряжениях и токах является одной из актуальных задач современной электроэнергетики. В частности, при анализе гармонических составляющих со стороны поставщика электроэнергии (в точке подключения сети) определяются коэффициенты гармонических искажений напряжений и токов. Если их значения превышают установленные стандартами, то в основных точках размещают специальные устройства для снижения величины этих коэффициентов до необходимого уровня, в том числе, устройства по компенсации реактивной мощности. Отдельные изменения могут быть внесены для наиболее уязвимых участков электрической сети [5].

Для исследования сигнала напряжения и тока с целью выявления гармонических составляющих активно используются всевозможные программные комплексы и методы математического моделирования [6 – 10].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что совершенствование методики, разработка новых моделей и программ для определения коэффициентов гармонических составляющих и фаз является важной задачей в определении качества электроэнергии.

Существует множество программ для анализа сигналов, в частности, – TFastFourier, FourSynthesis, FFTAnalysis [11].

Программа TFastFourier может преобразовывать массивы данных объемом до 16 млн. выборок в обоих направлениях и предлагает несколько наиболее важных программных функций (например, Хэмминга, Блэкмана, косинус квадрат и др.). Она вычисляет действительную и мнимую части, спектр мощности, величину и фазу спектра сигналов. Источник ввода сигнала – программа. Преимущества программы – готовые модели сигналов, простой дисплей, большие возможности для преобразования выборок. Недостатки программы – малый дисплей, очень маленькая группа сигналов, отсутствует пользовательский ввод сигнала.

Программа FountSynthesis использует обратное преобразование Фурье для синтеза сигнала. Пользователь сразу видит влияние изменения коэффициентов ряда Фурье на анализируемый сигнал. Источник сигнала – программа. Преимущества программы – возможность регулирования сигнала, удобный интерфейс, возможность ввода сигнала программой, удобное окно вывода графических данных. Недостатки программы – имеет относительно малую функциональность, отсутствует ввод данных для сигнала.

FFTAnalysis отображает Фурье–спектр периодического сигнала. Пользователь может

отрегулировать уровень шума и частоту одного из компонентов сигнала. Источник сигнала – программа. Преимущества программы – возможность регулировать сигнал с помощью двух регуляторов, возможность менять результат с помощью дополнительных инструментов. Недостатки программы – отсутствует пользовательский ввод данных для сигнала, результат выводится графиком, отсутствует вывод коэффициентов на экран.

Несовершенство имеющихся программ ведет к получению недостоверных результатов, что в свою очередь приводит к погрешности в определении коэффициентов гармонических искажений и фазового угла.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таким образом, была поставлена задача создания программы для анализа гармонических составляющих сигналов токов и напряжений с возможностью вывода результатов в удобном для пользователя виде.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Для решения этой задачи был разработан алгоритм математической модели разложения сигнала в ряд Фурье (рис. 1). Программа, реализующая данный алгоритм, написана на языке VisualBasic.Net.

Программа создавалась в несколько этапов. Вначале была разработана простая мини-программа, в которой была возможность задать оси координат, функцию, построить ее график и посчитать ее интеграл.

Внешний вид главной страницы такой мини-программы представлен на рис. 2. В этой программе можно использовать только готовые модели сигналов для получения результата.

При создании окончательной версии программы за основу была взята разработанная мини-программа, в которую были добавлены новые программные функции, процедуры, объекты и формы (рис. 3).

Главной задачей было «научить» программу интегрировать значения каждого участка, сохранять в массив переменной и визуализировать их на графике.

Как известно, функцию $f(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi)$ вещественной переменной t , определенную в каждой точке промежутка $[\theta, \theta + 2\pi]$ можно представить в виде ряда:

$$b_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin kt + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos kt,$$

где b_0 , a_k , b_k – независимые от t коэффициенты [12].

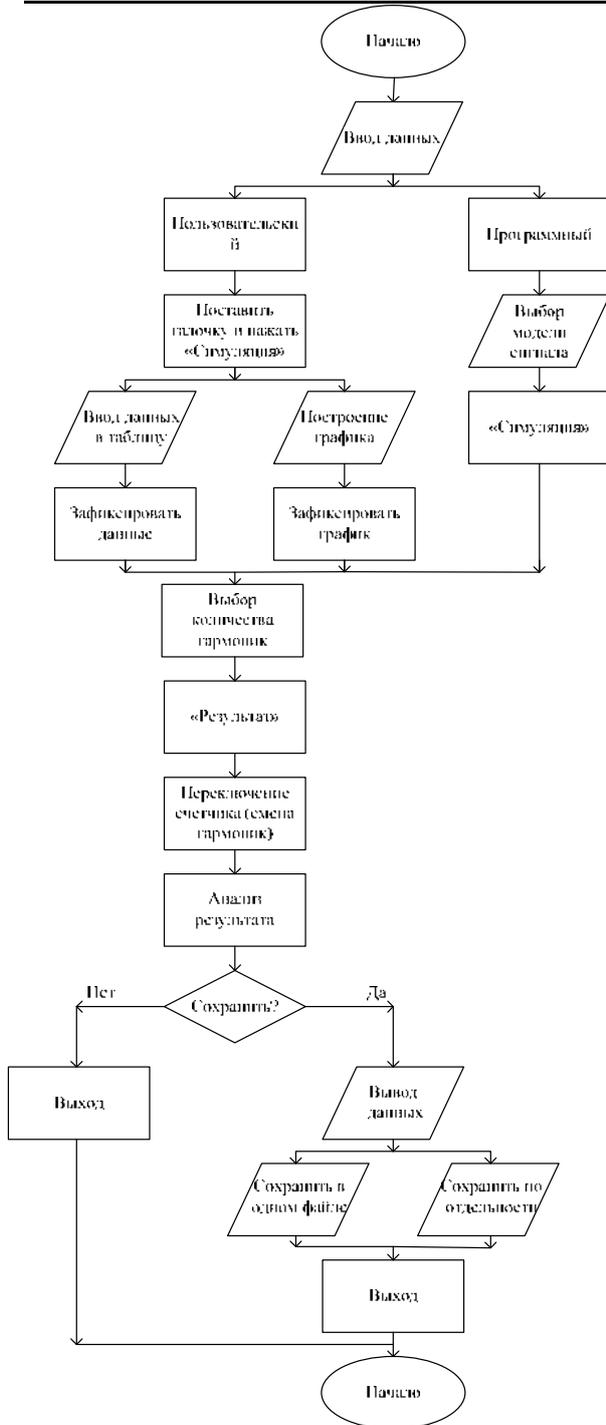


Рис. 1. Алгоритм математической модели разложения сигнала в ряд Фурье

Программный код для расчёта коэффициентов a_k , b_k выглядит следующим образом:

```

'Задаём счётчик до k(количество гармоник)
For j = 0 To k
'Обнуляем суммы для коэффициентов
suma = 0
sumb = 0
'Считаем в цикле интеграл для коэффициентов
For i = 0 To n - 1

```

```

'Рассчитываем x
tt = tmin + dt * i
'Считаем начальное значение для ak, bk
suma += ft(i) * Cos(w1 * j * tt) * dt
sumb += ft(i) * Sin(w1 * j * tt) * dt
Next
'Считаем коэффициенты ak, bk
ak(j) = 2 / tmax * suma
bk(j) = 2 / tmax * sumb
'Задаём счётчик (в данном случае от 1)
For j = 1 To k
For i = 0 To n - 1
'Рассчитываем (x)
tt = tmin + dt * i
'Рассчитываем суммарное значение (для графика)
Ffur(j, i) = ak(j) * Cos(w1 * j * tt) + bk(j) * Sin(w1 * j * tt)
Next
Next

```

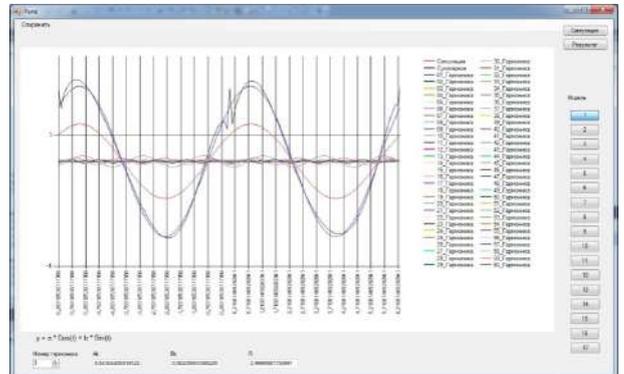


Рис. 2. Внешний вид главного окна первой мини-программы

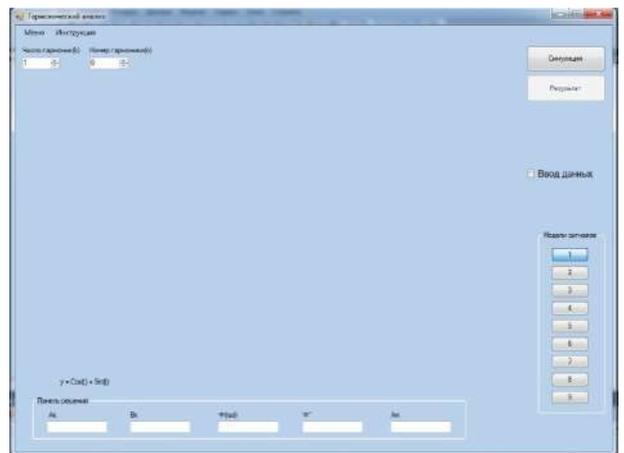


Рис. 3. Внешний вид главного окна окончательной версии программы

Программный код для расчёта угла φ и амплитуды A_m выглядит следующим образом:

```

'Задаём счётчик от 0 до k(число гармоник)
For j = 0 To k
'Рассчитываем угол fi
fi(j) = Atan(bk(j) / ak(j))
'Расчёт угла в градусах

```

$$q(j) = (f_i(j) * 180) / \text{PI}$$

'Расчёт амплитуды

$$Am(j) = \text{Sqrt}(ak(j) ^ 2 + bk(j) ^ 2)$$

Вывод результатов на экран пользователя происходит с помощью инструментов TextBox. Для расширения возможностей программы была реализована возможность ввода данных в форме таблицы DataGridView (Рис. 4) и графика, нарисованного от руки PictureBox (Рис. 5).

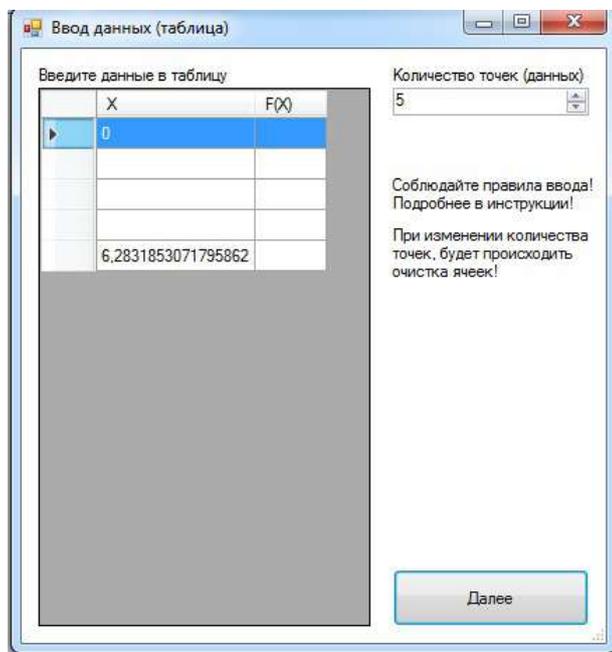


Рис. 4. Внешний вид окна ввода данных в форме таблицы

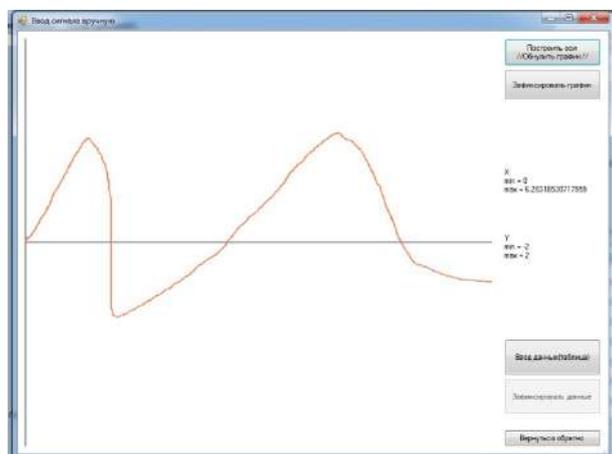


Рис. 5. Внешний вид окна ввода данных в форме графика, нарисованного от руки

Программные коды для ввода данных в форме таблицы и в виде рисунка выглядят следующим образом:

```
'Фиксируемая ячейки
Dim pntF(nRows - 1) As PointF
'Задаем цикл
For i = 0 To nRows - 1
'Сохраняем массив точки
pntF(i) =
New PointF(DataGridView1.Rows(i).Cells(0).
```

```
Value,
DataGridView1.Rows(i).Cells(1).Value)
Next
'Фиксируем объект
Me.Tag = pntF
'Закрываем окно
Me.Close()

'Рисование вниз
'x=координате в пространстве оси X
Dim x As Integer = e.Location.X
'y=координата в пространстве оси y
Dim y As Integer = e.Location.Y
'Задаем условия
If x <> 0 Then x = 0
'Задаем новые точки
pnt = New List(Of PointF)
pp = New PointF(x, y)
'Сохраняем
pnt.Add(pp)
'Возвращаем значение "Правда"
isDraw = True
'Выводим g на график
g = Graphics.FromImage bmp)
'Рисование вверх
'Если isdraw не правда то выйти из
процедуры
If Not isDraw Then Exit Sub
'Повторяем приравнивание координатам
Dim x As Integer = e.Location.X
Dim y As Integer = e.Location.Y
'Задаем условия
If x <> w Then x = w
'Задаем точки
pnt.Add(New PointF(x, y))
'Рисуем
g.DrawLine(pnGraphics, pp,
pnt(pnt.Count - 1))
'Возвращаем значение "Ложь"
isDraw = False
'Освобождаем
g.Dispose()
'Вывод на экран
PictureBox1.Image = bmp
'Рисование по сторонам
'Если Isdraw есть то
If isDraw Then
'Приравняем координаты
Dim x As Integer = e.Location.X
Dim y As Integer = e.Location.Y
'Задаем условия
If x <= pp.X Then Exit Sub
'Новые точки
Dim p As PointF = New PointF(x, y)
'Рисуем
g.DrawLine(pnGraphics, pp, p)
'Добавляем точки
pnt.Add(p)
pp = p
'Вывод на экран
PictureBox1.Image = bmp
```

EndIf

Пользователю предоставлено право выбора сигнала для анализа: задать сигнал с помощью готовых моделей или ввести данные вручную одним из предоставленных способов. Для перехода в режим ручного ввода достаточно поставить галочку в окне «CheckBox», после чего в окне «Ввод данных» (Рис. 6) требуется выбрать один из способов ввода информации. После ввода данных необходимо подтвердить их соответствующей кнопкой.

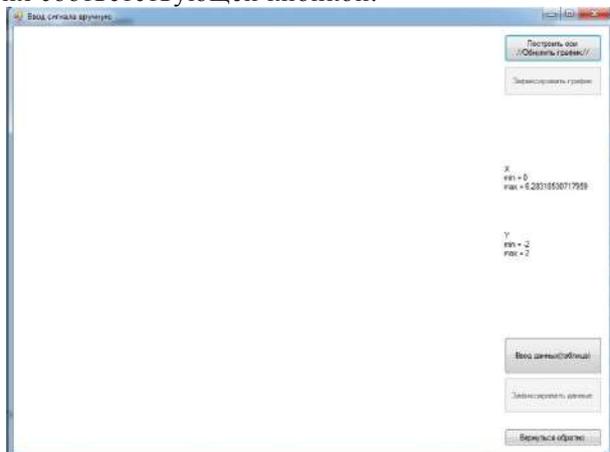


Рис. 6. Внешний вид окна ввода данных

При необходимости ввода данных программой, т.е. с помощью готовых моделей, следует выбрать один из сигналов и произвести симуляцию данной модели. После выполнения всех действий нужно выбрать количество гармоник (на счётчике) и нажать «Результат». На экран будет выведено следующее: «Суммарное значение», k -я гармоника (с возможность регулирования номера с помощью счётчика), а также кривые гармонических составляющих. Ниже в «Панели решений» будут представлены результаты по коэффициентам a_k , b_k , углу φ и амплитуды A_m .

Счётчики (NumericUpDown) – достаточно удобное решение для того, чтобы у пользователя была возможность видеть не только график, но и результат на панели решений. Полученный результат пользователь может сохранить.

ВЫВОДЫ

Наличие высших гармоник сигнала напряжения и тока крайне негативно сказываются на качестве электроэнергии, и, в результате, на надежности, эффективности и долговечности работы электрооборудования, что несет большие экономические потери его эксплуатантам. Анализ литературы показал, что вопросу вычисления коэффициентов гармонических составляющих при исследовании качества электроэнергии уделяется большое внимание. В частности, приобретает популярность использование различных математических моделей и алгоритмов для

определения параметров напряжения и тока. Результатом данной работы является алгоритм и реализующая его программа для исследования гармонических составляющих напряжений и токов. Она позволяет рассчитывать для гармонического сигнала коэффициенты a_k , b_k его разложения в ряд Фурье, а также его амплитуду A_m и начальную фазу φ . Ввод сигнала для анализа возможен тремя способами: выбором из готовых моделей, заложенных в память программы; с помощью таблицы; с помощью графика, нарисованного вручную.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2012. 20 с.
- ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во стандартов, 1997. 44 с.
- ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
- Измерение и устранение гармоник. Выпуск № 30. Техническая коллекция Schneider Electric, 2009. 48 с.
- Зырянов В.М. Анализ гармонического состава тока и напряжения на шинах 0,4 кВ КТПН и применение устройств ограничения высших гармоник / В.М. Зырянов, Н.А. Митрофанов, Ю.Б. Соколовский // Вестник ИрГТУ. 2016. № 2 (109). С. 61 – 67.
- Запальский В.Н. Спектральный анализ токов и напряжений автономных электроэнергетических систем / В.Н. Запальский // Вестник КГПУ им. Михаила Остроградского. 2007. Выпуск 6 (47). С. 12 – 16.
- Куцыло А.В. Гармонический анализ токов и напряжений, полученных в результате вычислительного эксперимента / А.В. Куцыло, А. А. Мазуренко, И.В. Новаш // Энергетика. Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. 2011. № 2. С. 11 – 15.
- Шклярский Я.Э. Влияние гармонического состава тока и напряжения на мощность искажения / Я.Э. Шклярский, А.А. Брагин, В.С. Добуш // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 4. С. 26 – 31.
- Разработка программно-аппаратного комплекса для оценки технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом / А.В. Самородов, М.Г. Баширов, Д.Г. Чурагулов, А.А. Абдуллин // Электронный

научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 6. С. 10 – 20.

10. Елизаров Д.А. Повышение точности оценки показателей несинусоидальности напряжения в электроэнергетических системах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.02 / Дмитрий Александрович Елизаров. – Омск 2014. – 154 с.

11. SDL Component Suite Fourier [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lohninger.com/fourier.html?referrer=googlefft>.

12. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго; пер. с фр. под ред. К. С. Шифрина. – М.: Наука, 1964. – 772 с

Bekirov E. A., Asanov M. M., Polyanovsky D. V.

PROGRAM FOR THE ANALYSIS OF VOLTAGES AND CURRENTS HARMONIC COMPONENTS

Annotation. The influence of non-sinusoidal voltage and current on the electrical equipment operation is analyzed. The main types of influences that harmonics have on electrical equipment are shown. The increasing role of mathematical modeling and algorithmization in the study of electricity quality is noted. An algorithm and a program for determining the parameters of a harmonic signal are developed. A signal can be selected from the program database, set by a table or as a hand-drawn graph. Calculation results output is performed using the TextBox tools.

Key words: algorithm, analysis, higher harmonics coefficients, mathematical mode