

Моделирование режимов трёхфазной цепи с поперечной несимметрией

В статье показан процесс моделирования режимов электрических цепей в программной среде LabVIEW. Целью моделирования является разработка компьютерной программы (прибора) для иллюстрации в учебном процессе очного и заочного (дистанционного) образования электрических процессов в трёхфазной цепи при различных несимметричных режимах, и для определения параметров этих режимов в практических целях (расчёт К.3).

Ключевые слова: программная среда LabVIEW, лицевая панель, виртуальная установка, прибор, трёхфазная цепь, поперечная несимметрия, векторная диаграмма.

MODELLING OF MODES OF A THREE-PHASE CHAIN WITH CROSS-SECTION ASYMMETRY

In article process of modelling of modes of electric chains in program LabVIEW environment is shown. The modelling purpose is working out of the computer program (device) as for an illustration of electric processes in a three-phase chain at various asymmetrical modes in educational process of internal and correspondence (remote) formation, and for definition of parameters of these modes in the practical purposes (calculation K.3).

Keywords: Program LabVIEW environment, the obverse panel, virtual installation, the device, a three-phase chain, cross-section asymmetry, the vector diagramme.

Введение

В последние годы в ВУЗах страны наряду с реальными установками для научных и учебных целей применяют их виртуальные аналоги. Это значительно удешевляет затраты и расширяет области учебных исследований. Особенно это актуально и эффективно в лабораторных работах учебного процесса в ВУЗах, когда студенты могут исследовать сложные явления, имеющие место в сложных установках, во всех их проявлениях и на всём диапазоне их действия на компьютере, в том числе на домашнем. Эффект познания значительно усиливается при использовании наглядной и рациональной графической интерпретации результатов. В связи с этим применение виртуальных приборов особенно целесообразно в учебных дисциплинах, где графическая информация может быть преобладающей. Это электротехника, электроника с их волновыми, векторными, топогра-

фическими, круговыми диаграммами, частотными и другими характеристиками.

Как правило, компьютерные программы, создаются совместной работой специалистов по профилю темы и программистов. Однако значительно проще и эффективнее процесс разработки приборов происходит при простой программной среде, освоенной специалистом по профилю темы. К таким программам относится LabVIEW National Instrument.

В статье показан процесс разработки инженером-электриком, преподавателем ВУЗа компьютерной программы электротехнической установки (виртуального прибора) для исследования несимметричных режимов трёхфазных цепей в учебных целях.

Используется математическое описание трёхфазной электрической цепи при различных режимах поперечной несимметрии (одно и двухфазные короткие замыкания на землю, межфазные замыкания). Прибор

представляет собой виртуальную установку, на которой можно как и на реальном устройстве выполнять различные исследования. Описан процесс графического программирования электрических явлений, создания лицевой панели прибора и основные моменты разработки блок-диаграммы. В конце статьи приведены результаты исследования конкретных примеров возможных режимов, показаны их векторные и топографические диаграммы.

Были поставлены задачи:

- обосновать и конкретизировать математическую модель рассматриваемой трёхфазной цепи с поперечной несимметрией для всех возможных её режимов,
- определить структуру разрабатываемого прибора,
- разработать компьютерную программу,
- спроектировать лицевую панель прибора с учётом задач функционирования.

Теоретические положения режимов исследуемой цепи подроб-



Геннадий Павлович Карабашев,
к.т.н. доцент
Тел.: (3412) 72-35-46
Эл. почта: Karabashev1938@mail.ru
ФГБОУ ВПО Ижевская
Государственная
сельскохозяйственная академия

Gennadij P. Karabashev,
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor
Tel.: (3412) 72-35-46
E-mail: Karabashev1938@mail.ru
Izhevsk State Agricultural Academy

но описаны в учебниках по курсу «Теоретические основы электротехники» [1]. Обычно несимметричные режимы в трёхфазных цепях возникают в аварийных условиях. Различают два вида несимметрии – поперечную и продольную.

Поперечная несимметрия в трехфазной цепи, для исследования которой разрабатывается виртуальный прибор, возникает при несимметричной нагрузке. К ней, в частности, относятся различные виды несимметричных коротких замыканий (замыкания между фазами, замыкание одной или двух фаз на землю).

В качестве конкретного объекта применения компьютерной программы взят асинхронный электродвигатель, который относится к группе электрических устройств с так называемой «динамической» нагрузкой. В них параметры зависят от несимметрии подводимого напряжения и поэтому электрические цепи с такими нагрузками рассчитываются методом симметричных составляющих.

Схема исследования представлена на рис. 1.

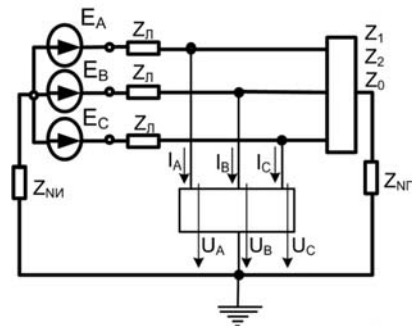


Рис. 1. Схема исследуемой цепи

Имеется симметричный источник, подводящая напряжение к электродвигателю линия в виде

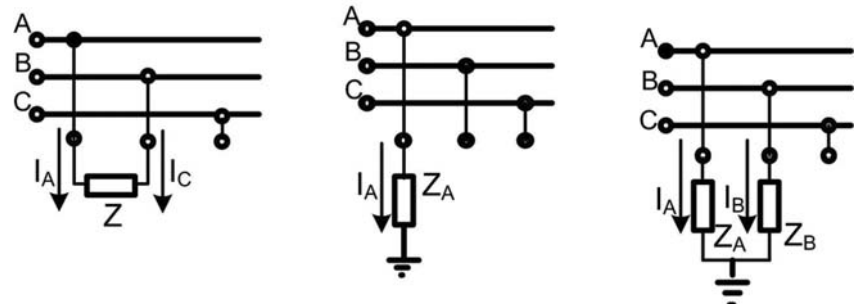


Рис. 2. Схемы несимметричных режимов

симметричной системы сопротивлений фаз и электродвигатель как симметричная нагрузка с сопротивлениями фазы токам прямой, обратной и нулевой последовательности (Z_1, Z_2, Z_0), а также несимметричный участок с поперечным включением.

Несимметричную часть цепи представляют следующими режимами (схемами) (рис. 2)

Если сопротивления в представленных схемах равны нулю, то это короткие замыкания.

Эти все несимметричные режимы цепи можно учитывать на общей схеме, где значения Z_A, Z_B, Z_C, Z_3 меняются в зависимости от вида несимметрии (рис. 3)

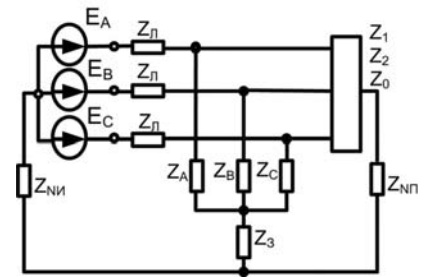


Рис. 3. Вид преобразованной схемы исследования

В соответствии с методикой расчёта несимметричный участок цепи заменяется на трёхфазный источник с несимметричной системой неизвестных напряжений U_A, U_B, U_C , которые затем разлагаются на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности (рис. 4). Это полная расчётная схема, в которой предусмотрены также режимы для приёмника и источника с нулевыми проводами и без них. Для полученной симметричной трёхфазной цепи расчёт ведётся для одной фазы, для которой составляются расчётные

схемы для всех трёх последовательностей (рис. 5).

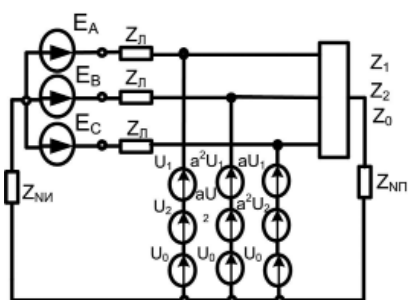


Рис. 4. Схема исследования при замене несимметричной трёхфазной ЭДС составляющими симметричных систем

Режим исходной схемы определяется путем наложения режимов этих трех схем последовательностей.

Для дальнейшего расчета целесообразно преобразовать схемы отдельных последовательностей методом эквивалентного генератора к простейшему виду (рис. 6), не затрагивая при этом ветвей с источниками неизвестных напряжений $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$.

Уравнения по полученным схемам имеют вид

$$\begin{aligned} Z_{Э1}I_1 + U_1 &= E_{Э1}; \\ Z_{Э2}I_2 + U_2 &= 0; \\ Z_{Э0}I_0 + U_0 &= 0; \end{aligned}$$

Уравнения для участка несимметрии (рис.2)

$$\begin{aligned} U_A &= I_A Z_A + I_3 Z_3; \\ U_B &= I_B Z_B + I_3 Z_3; \\ U_C &= I_C Z_C + I_3 Z_3; \end{aligned}$$

Эти же уравнения, токи и напряжения которых выражены через их симметричные составляющие

$$I_3 = I_A + I_B + I_C = 3I_0;$$

$$\begin{aligned} U_1 + U_2 + U_0 &= \\ &= Z_A(I_1 + I_2 + I_0) + 3I_0 Z_3; \\ a^2 U_1 + a U_2 + U_0 &= \\ &= Z_B(a^2 I_1 + a I_2 + I_0) + 3I_0 Z_3; \\ a U_1 + a^2 U_2 + U_0 &= \\ &= Z_C(a I_1 + a^2 I_2 + I_0) + 3I_0 Z_3; \\ Z_{Э1}I_1 + U_1 &= E_{Э1}; \\ Z_{Э2}I_2 + U_2 &= 0; \\ Z_{Э0}I_0 + U_0 &= 0; \end{aligned}$$

В схеме для токов нулевой последовательности величина сопротивления нулевого провода утраивается, для симметричного генератора ЭДС обратной и нулевой последовательностей будут отсутствовать.

Решая эту систему уравнений при определённых значениях параметров $Z_1; Z_2; Z_0; Z_A; Z_B; Z_C; Z_3$, определяются значения электрических величин всех трёх последовательностей, а затем и реальных электрических величин.

Разработка программы начинается с лицевой панели. Компьютерная программа моделируемого устройства называется прибором. На лицевую панель помещена схема исследуемой установки, которая функционально соответствует реальной, в том числе и измерительными приборами.

Для задания различных режимов исследуемой цепи на лицевой панели помещены задачки фазного напряжения сети, сопротивлений линии и элементов узла несимметрии, сопротивлений фаз электродвигателя тока прямой и обратной и нулевой последовательности.

Программа функционирования исследуемого устройства разработа-

тывается на другой панели – блок-диаграмме, состоящей из трёх блоков.

- Решение системы уравнений и определение электрических величин всех последовательностей для одной фазы цепи;
- Определение электрических величин исследуемой цепи;
- Разработка систем изображения результатов исследования.

При задании на лицевой панели элементов контроля и измерительных приборов на блок-диаграмме появляются их терминалы с такими же обозначениями. Кроме терминалов элементов контроля (задатчиков) и индикаторов (измерительных приборов) на блок-диаграмме должны быть функциональные элементы, выполняющие определённые математические и другие действия.

В первом блоке главным элементом блок-диаграммы исследуемого прибора (рис. 7) можно считать Solve Linear Equatons (решение линейных уравнений) [2]. Для установки этого элемента на блок-диаграмму вызывается палитра функций и его находят по пути **Mathematics > Linear Algebra > Solve Linear Equatons**. С помощью этого элемента находится решение составленной системы уравнений.

На левый верхний терминал **Input Matrix** элемента **Solve Linear Equatons** подаётся исходная матрица коэффициентов исследуемой системы уравнений. Вектор заданных воздействий **Known Vector** (правая часть уравнения) подводится к левому среднему терминалу, а результирующий вектор **Solution Vector** (вектор искомых электрических величин) – снимается с правого верхнего терминала.

В разрабатываемом приборе матрица коэффициентов исследуемого уравнения подаётся на **Solve Linear Equatons** не непосредственно, а через функцию работы с массивами **Replace Array Subset**. Это связано с тем, что с помощью этого прибора потребуется моделировать различные несимметричные режимы электродвигателя, меняя параметры схемы.

На вход «array» **Replace Array Subset** подаётся структура массива

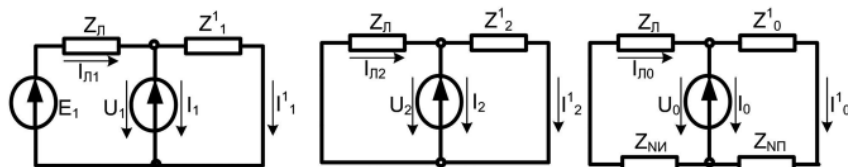


Рис. 5. Схемы замещения одной фазы

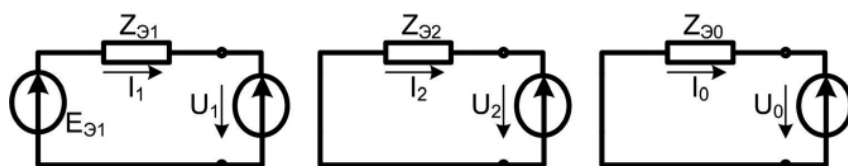


Рис. 6. Расчётные схемы замещения всех последовательностей одной фазы

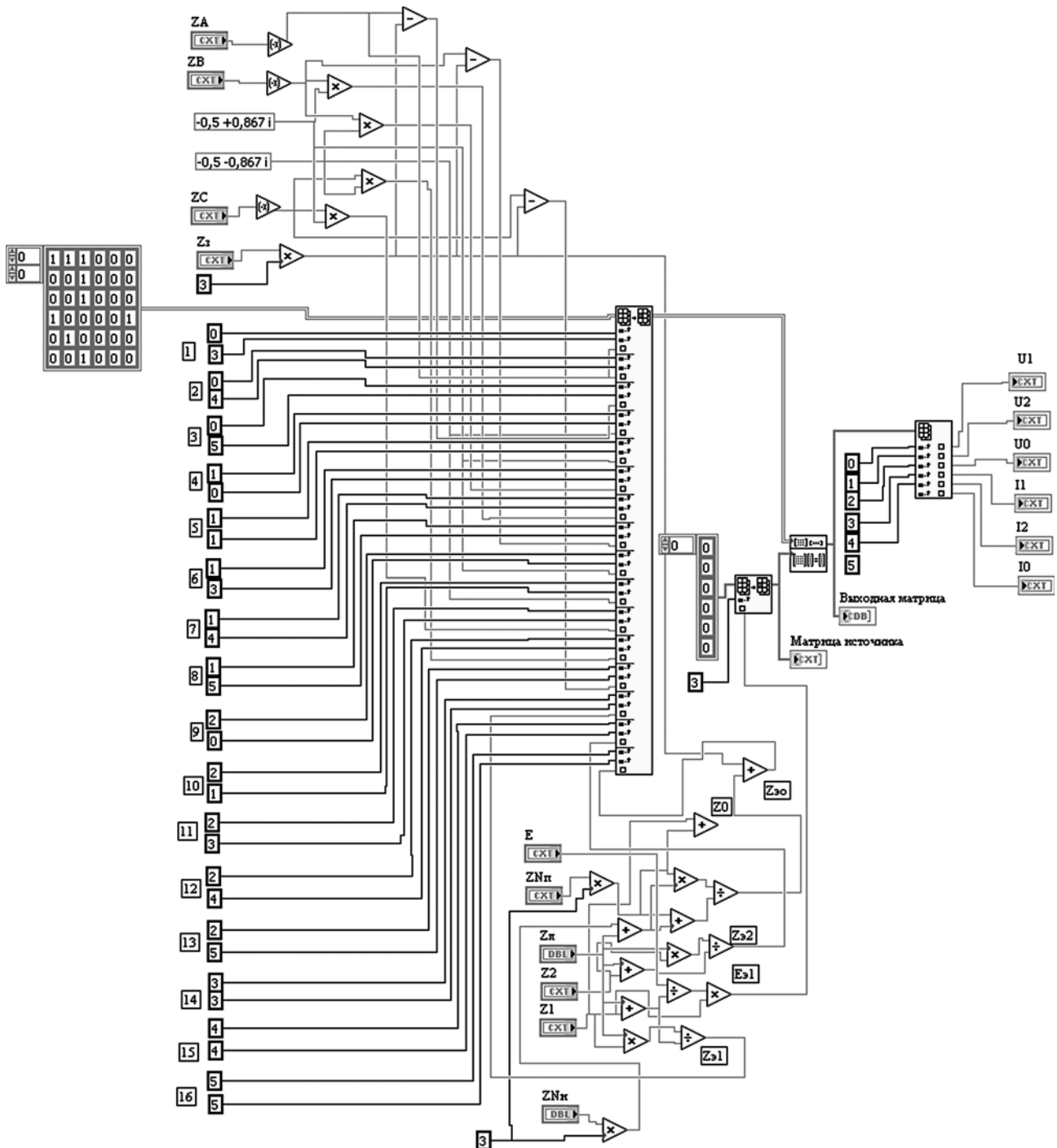


Рис. 7. Блок – диаграмма решения системы уравнений электродвигателя

исследуемой системы уравнений. Члены массива как члены уравнений системы, не содержащие параметров цепи, остаются неизменными при изменении режимов. Изменяются члены массива, в которых в качестве сомножителей присутствуют параметры $Z_1; Z_2; Z_0; Z_A; Z_B; Z_C; Z_3$. Они являются параметрами, задающими режим нагрузки, и вводятся в уравнения каждый раз когда задаётся новый режим.

Система уравнений исследуемой цепи в матричном виде

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & -Z_A & -Z_A & -Z_A & -3Z_3 \\ a^2 & a & 1 & -a^2Z_B & -aZ_B & -Z_B & -3Z_3 \\ a & a^2 & 1 & -aZ_C & -a^2Z_C & -Z_C & -3Z_3 \\ 1 & 0 & 0 & Z_{\phi 1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & Z_{\phi 2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & Z_{\phi 0} & 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{matrix} = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_1 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}$$

Для вывода результатов расчёта используется функция **Index Array**. Функция выводит нужные для дальнейшего использования

результаты решения системы уравнений, напряжения и токи всех последовательностей для одной фазы (фазы A) (рис. 7).

Определение электрических величин, оценивающих основные факторы режимов исследуемой цепи можно провести следующим образом.

Напряжения на фазах электродвигателя

$$\begin{aligned} U_A &= U_1 + U_2 + U_0; \\ U_B &= a^2U_1 + aU_2 + U_0; \end{aligned}$$

$$U_C = aU_1 + a^2U_2 + U_0;$$

По найденным токам прямой, обратной и нулевой последовательностей одной фазы определяются токи несимметричного участка цепи

$$\begin{aligned} I_A &= I_1 + I_2 + I_0; \\ I_B &= a^2I_1 + aI_2 + I_0; \\ I_C &= aI_1 + a^2I_2 + I_0; \end{aligned}$$

Эти же токи для проверки методики рассчитаем и так

$$\begin{aligned} I_A &= U_A / (Z_A + Z_3); \\ I_B &= U_B / (Z_B + Z_3); \\ I_C &= U_C / (Z_C + Z_3). \end{aligned}$$

Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей нагрузки (электродвигателя)

$$\begin{aligned} I_1^1 &= U_1 / Z_1; \\ I_2^1 &= U_2 / Z_2; \\ I_0^1 &= U_0 / Z_0; \end{aligned}$$

Фазные токи нагрузки (электродвигателя)

$$\begin{aligned} I_{АН} &= I_1^1 + I_2^1 + I_0^1 \\ I_{ВН} &= a^2I_1^1 + aI_2^1 + I_0^1 \\ I_{СН} &= aI_1^1 + a^2I_2^1 + I_0^1 \end{aligned}$$

Токи, потребляемые всей цепью от источника

$$\begin{aligned} I_{АН} &= I_A + I_{АН} \\ I_{ВН} &= I_B + I_{ВН} \\ I_{СН} &= I_C + I_{СН}. \end{aligned}$$

Для создания наглядности полученных результатов исследования целесообразно использовать векторные и топографические диаграммы, которые вместе с другими элементами устройства представлены на лицевой панели прибора (Рис. 8).

На лицевой панели прибора расположена схема исследуемой установки, задатчики параметров цепи, индикаторы электрических величин, оценивающих режимы цепи, и экраны для векторных диаграмм.

На верхнем экране иллюстрируются векторные диаграммы токов и напряжений на приёмнике, на нижнем – диаграммы токов и их составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей на участке несимметрии. Для оценки диаграмм даются обозначение векторов, а также их значения в комплексной форме.

Работоспособность и адекватность функционирования прибора определяется заданием и оценкой результатов наиболее известных и легких для контроля режимов.

На лицевой панели прибора (рис. 8) показан режим короткого замыкания между фазами А и В. На верхнем экране показаны векторы фазных напряжений и токов симметричного приёмника (электродвигателя). Особенно ярко режим этого короткого замыкания между фазами иллюстрируется на нижнем экране. Показаны векторы токов трёхфазных систем прямой и обратной последовательности, сумма которых образует два равных и противоположных по направлению тока замкнутых между собою фаз А и В.

На рисунках 9 и 10 иллюстрируются векторные диаграммы токов и напряжений в исследуемой цепи коротком замыкании фазы А на землю.

Прибор можно выполнить таким образом, чтобы индикаторы электрических величин были заме-

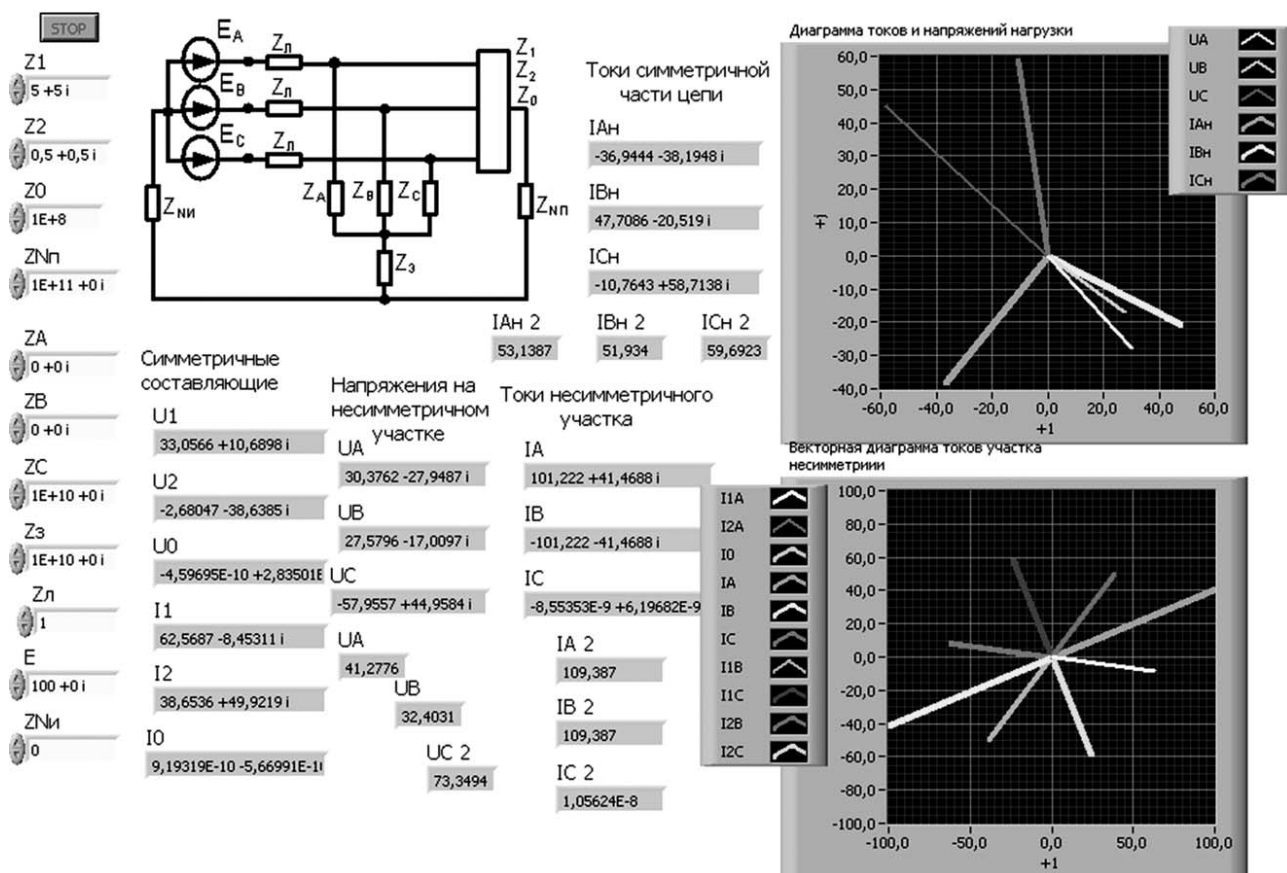


Рис. 8. Лицевая панель прибора

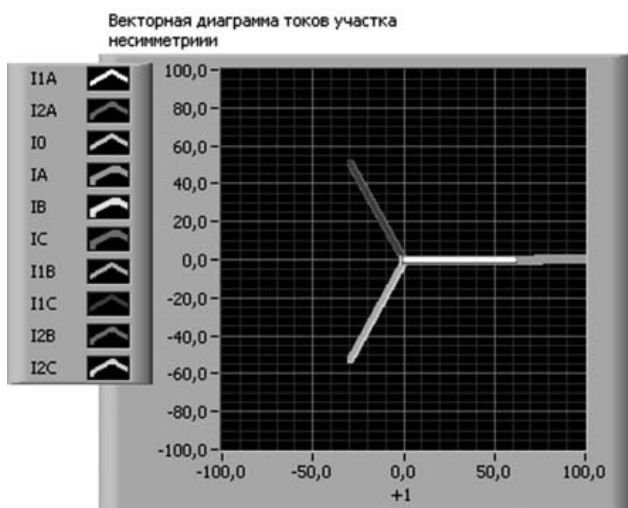


Рис. 9. Векторная диаграмма токов при коротком замыкании фазы А

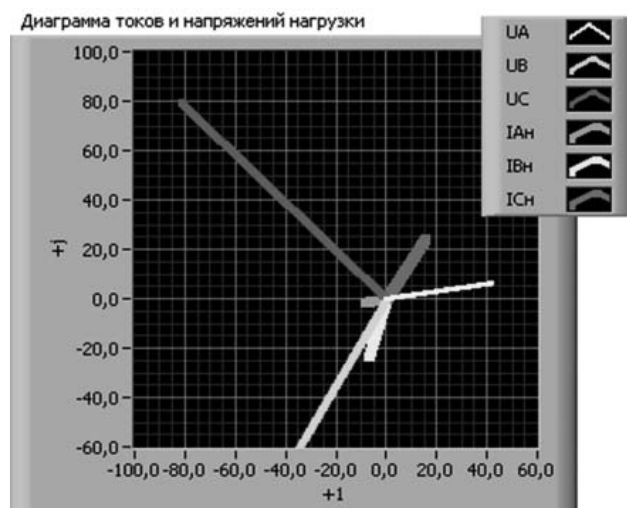


Рис. 10. Векторная диаграмма напряжений и токов на симметричной нагрузке при коротком замыкании фазы А

нены измерительными приборами, и получится виртуальная лабораторная установка для учебных или исследовательских целей.

Выводы

1. С помощью программной среды LabVIEW вполне возможно разрабатывать компьютерные

программы для исследования относительно сложных явлений без непосредственной помощи квалифицированных программистов.

2. Компьютерная программа (виртуальный прибор), представленная в статье, как и подобные другие в определённых условиях, позволяет исследовать в учебных целях процессы в электрических

цепях и наглядно представлять результаты при значительно меньших материальных затратах. Прибор применяется в лабораторной работе по изучению метода симметричных составляющих.

3. Применение таких виртуальных установок создают условия для расширения дистанционного образования на инженерные специальности.

Литература

1. Основы теории цепей. М., «Энергия», 1989. Авт.: Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. – 475 с.
2. Суранов А.Я. LabVIEW 8: Справочник по функциям. – М.: ДМК Пресс. 2007. – 400 с.