

различия. Тем не менее, корректное моделирование сплошного экрана сеточной моделью возможно.

Сплошной экран конечной толщины может быть приближенно заменен моделью тонкого экрана (без затухания волны) с эквивалентной проводимостью, найденной из условия неизменности коэффициента экранирования (плоской волны). В диапазоне частот молнии (25 кГц и выше) проводимость модели принимается бесконечно большой (идеальный экран), внутреннее сопротивление экрана равно нулю, емкостными токами пренебрегаем. Экран заменяется сеткой стержней. Диаметр стержня выбирается из условия неизменности внешней индуктивности пластины  $d=0.36a$ , где  $a$  – ширина пластины (расстояние между стержнями в сеточной модели). Тестирование показало адекватность сеточных моделей сплошных экранов в рассматриваемом диапазоне частот на уровне точности до 5% (рис.4). Таким образом, сплошные экраны также моделируются сетками, что позволяет проводить их расчеты по единым с ЗУ моделям, методам, программам.

**Выводы.** Современные задачи расчета ЗУ по постановке, методам и требуемым результатам являются цепно-полевыми, а для их решения требуются две взаимосвязанные модели – полевая и цепная. Полевая модель предназначена для расчета электромагнитных параметров элементов и анализа электромагнитной обстановки. Цепная модель обеспечивает наиболее эффективный способ расчета токов элементов (продольных и стекающих) при гармонических и импульсных воздействиях. Расчет переходных процессов проводится методом дискретных схем, позволяющим учесть нелинейные и частотно-зависимые сопротивления. Использование переходного сопротивления расширяет возможности нормирования и сравнения характеристик ЗУ при импульсных воздействиях. Многослойная модель земли с границами произвольной формы расширяет класс решаемых задач. Сеточные модели электромагнитных экранов позволяют решать задачи электромагнитного экранирования совместно с расчетами ЗУ.

#### Литература

1. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств. Электричество. – 2010. – № 1. – С. 16 – 23.
2. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Шишигин С.Л. Сопротивление заземлителя в многослойной земле с границами произвольной формы. Электричество. – 2013. – № 4. – С. 18 – 23.
4. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.

Шишигин Д.С., Шишигин С.Л.

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА МОЛНИЕЗАЩИТЫ, ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ЭМС, ИНТЕГРИРОВАННОГО В AUTOCAD

При проектировании электрических подстанций производится компьютерное моделирование аварийных ситуаций при ударах молнии, коротких замыканиях, коммутации электрооборудования. Проектировщик обязан найти технические решения, обеспечивающие надежность работы объекта, требования ЭМС и

электробезопасности. Отсюда высокие требования к программному обеспечению. Многофункциональное вычислительное ядро с современными математическими моделями и методами – необходимое условие конкурентоспособности программы.

Геометрическое моделирование в AutoCAD – основное пожелание к программе со стороны проектировщиков. Оно реализуемо. Объектная модель AutoCAD открывает доступ ко всем методам, свойствам и событиям с геометрическими примитивами. Мы можем считывать данные из геометрических моделей (в dwg-файлах) или создавать чертежи в AutoCAD по данным расчета из собственной программы. Тенденция к разработке CAD-приложений вместо автономных программ прослеживается во всех современных программах для САПР во многих отраслях техники.

Наглядность результатов расчета – обязательное требование к программе. К сожалению, система AutoCAD не предназначена для научных расчетов и не имеет готовых компонентов для визуализации их результатов. Для этих целей предназначена система Mathcad, мы интегрировали с ним первую версию программы ZYM, однако это оказалось неудобно для проектировщиков. Научная графика с анимацией динамических процессов по образцу Mathcad для больших данных создана нами в AutoCAD.

Проектировщик сравнивает десятки и сотни промежуточных вариантов, чтобы найти правильное решение. Отсюда требование к высокой производительности вычислений. Мы покажем программно-аппаратные средства, позволившие добиться существенно большего быстродействия, чем конкурирующие программы.

Достоверность программы, ее ограничения можно определить только в ходе тестирования. В действующих стандартах установлена допустимая погрешность программы (5%), но нет тестовых задач. Мы приведем фрагмент теста, используемый для самотестирования.

**Цель настоящей работы** – познакомиться с программой ZYM [1], разработанной как приложение к AutoCAD, и продемонстрировать ее применение.

**Вычислительное ядро.** Математические модели и методы, заложенные в программе ZYM, рассмотрены в [2,3]. Они позволяют единообразно проводить весь комплекс расчетов систем молниезащиты, заземления, экранирования при разработке разделов ЭМС электрических подстанций и аналогичных объектов.

**Объектная модель AutoCAD.** Это механизм доступа к свойствам, методам, событиям, интерфейсам объектов AutoCAD из прикладной программы. Все геометрические примитивы (линии, полилинии, точки) текущего документа (назовем его *ADoc*) находятся в коллекции *ADoc.ModelSpace*. Число примитивов дает свойство *ADoc.ModelSpace.Count*. Для чтения всех геометрических объектов чертежа из собственной программы достаточно организовать цикл. Найдем тип и координаты *i*-объекта *Obj:=ADoc.ModelSpace.Items(i)*. Свойство *Obj.EntityType* содержит тип объекта. Пусть это линия (*EntityType=19*). Для реализации инструментов объектной модели предусмотрены компоненты называемые интерфейсами. Например, базовым интерфейсом всех графических примитивов является *IacadEntity*. Он является родительским для интерфейса *IacadLine*. С помощью этого интерфейса создаются объекты семейства *AcDbLine*, представителем которого является объект *Line*. Для приведения интерфейса объекта к интерфейсу линии используется оператор *as*: *Line:=Obj as IacadLine*. Тогда в массивах *Line.StartPoint[0:2]*, *Line.EndPoint[0:2]* содержатся координаты *x,y,z* узлов отрезка.

**Построение 3D графиков методом AddLine.** Будем рассматривать график как совокупность линий. Тогда построение графика заключается в циклическом применении метода *ADoc.ModelSpace.AddLine(StartPoint, EndPoint)*. Эта методика хорошо работает при рисовании сотен линий, но становится слишком медленной при построении графиков с тысячами линий. Графики с десятками тысяч линий строятся минутами на современном

персональном компьютере. В результате, от стандартного способа построения графика пришлось отказаться. Необходимо было найти новые способы построения графиков с большими данными.

**Построение 3D графиков в dxf кодах.** В основу решения задачи положена оригинальная идея: большие массивы данных для построения и анимации 3D-графиков в AutoCAD следует сохранять в dxf-формате (data exchange format). Фактически график заранее рисуется в dxf-кодах, а для оцифровки графика численные значения узлов сохраняются в расширенных данных (XDATA), связанных с каждой линией. Размерность dxf-файла может превышать миллион строк, но он быстро пишется и загружается в AutoCAD. В динамическом режиме создается последовательность временных кадров, каждый из которых сохраняется в отдельном слое, один слой делается видимым. Переключение между слоями создает эффект анимации как при просмотре стандартных avi-файлов. Система навигации кадров в виде плеера, создает покадровый просмотр динамических режимов в ручном режиме и анимацию при автоматическом включении/выключении кадров. Таким образом, построение 3D-графиков в dxf-кодах значительно быстрее стандартного способа методом *AddLine* для больших массивов данных. Создание средств научной графики в AutoCAD устраняет последнее препятствие к разработке AutoCAD приложения.

**Структура программы ZYM.** Программа ZYM включает (рис.1): вычислительное ядро и сервисную оболочку (интерфейс). Для ускорения матричных операций используются процедуры математического пакета Intel Math Kernel Library (Intel MKL). Доступ к AutoCAD обеспечивает объектная модель (COM технологии). Графики предварительно строятся в dxf формате и автоматически загружаются в AutoCAD. Для удобства пользователя основные команды AutoCAD продублированы в программе.

**Производительность вычислений** – одна из главных характеристик программы, необходимое условие ее конкурентоспособности. Высокая производительность достигается тщательным выбором математических моделей и методов, поэтому является косвенным признаком эффективности заложенных алгоритмов. Следует стремиться к векторной и матричной форме записи уравнений, которая не только компактна, но и более производительна на современных компьютерах.

Вторым этапом на пути ускорения вычислений является алгоритмическая оптимизация кода. Современный процессор работает на порядок быстрее оперативной памяти и этот разрыв все увеличивается. Поэтому значительным резервом повышения быстродействия является уменьшение обращений к медленной оперативной памяти и увеличение обращений к быстрой кэш памяти, которая сохраняет последние инструкции и данные. При кэш-попадании данные, требуемые процессору, уже находятся в кэше, обращения к внешней памяти не требуется. Задача программиста – максимально увеличить число кэш-попаданий и уменьшить кэш-промахов. Например, при умножении матриц происходит умножение строки одной матрицы на столбец другой. При чтении первого элемента строки последующие также считываются в кэш, поэтому доступ к ним далее будет быстрым (кэш-попадание). Но при чтении первого элемента

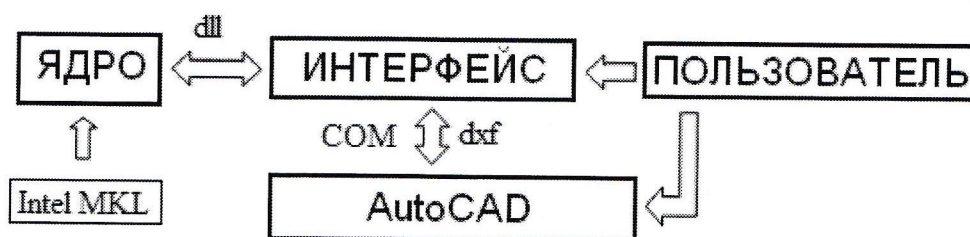


Рис. 1. Структура программы ZYM

столбца большой матрицы кэш будет содержать ненужные элементы (кэш-промах) и процессор вынужден повторно обращаться к оперативной памяти для чтения второго элемента. В математической библиотеке Alglib алгоритм перемножения матриц записан нестандартным способом – перемножение элементов матрицы происходит построчно (рис.2б), что сводит к минимуму кэш-промахи. В результате скорость умножения матриц возрастает в 7 раз (!) для квадратных матриц с типичной размерностью 2000, несмотря на увеличение арифметических операций. Таким образом, структура данных и алгоритмы операций в трудоемких процедурах должны быть продуманы.

```
for (int i = 0; i < N; ++i)
for (int j = 0; j < N; ++j)
for (int k = 0; k < N; ++k)
    C[i][j] += A[i][k] * B[k][j];
```

Рис. 2а. Стандартный код программы перемножения матриц (умножение строк на столбцы)

```
for (int i = 0; i < N; ++i)
for (int j = 0; j < N; ++j)
{
    pB = &B[j][0]; pC = &C[i][0];
    for (int k = 0; k < N; ++k)
    {
        *pC += A[i][k] * (*pB);
        ++pB; ++pC;
    }
}
```

Рис. 2б. Оптимизированный код программы (пакет Alglib, построчное перемножение)

Ускорение матричных операций – следующий резерв повышения производительности. Мы используем математический пакет Intel MKL, который ускоряет матричные процедуры в 10-50 раз по сравнению с пакетом Alglib (Таблица 1). Заметим, что высокому быстродействию матричных операций пользователи Mathcad и Matlab также обязаны Intel MKL. Существуют резервы дальнейшего ускорения вычислений при расчетах на графических процессорах. Они будут использованы по мере усложнения уровня решаемых задач.

Таблица 1

#### Сравнение пакетов Alglib и Intel MKL

Операция	AlgLib	Intel MKL	Сравнение
Умножение матриц $[A] \cdot [A]$	11.8 сек	0.6 сек	19 раз
Решение СЛАУ $[A] \cdot [X] = [B]$	3.9 сек	0.3 сек	13 раз
Обращение матрицы $[A]^{-1}$	28.8 сек	1.1 сек	26 раз
Решение комплексной СЛАУ $[C] \cdot [X] = [B]$	46 сек	0.9 сек	51 раз
Обращение комплексной матрицы $[C]^{-1}$	125 сек	3.6 сек	34 раз

(размерность матриц – 2000; ноутбук Intel Core i7 4x2.2 ГГц, ОЗУ 6 Гб)

**Тестирование** начинается с задач, имеющих аналитическое решение. В задаче 1 определяем сопротивление стержня и влияние числа элементов, на которые дробится стержень, на точность решения. В задаче 2 земля двухслойная, сопротивление выражается в виде бесконечных рядов. Зависимость числа членов ряда  $N$  от коэффициента отражения  $k = \rho_2 \rho_1 / \rho_2 + \rho_1$  свидетельствует о принятых мерах по ускорению сходимости. Для расчета сопротивления с погрешностью 0.1% при  $k=0.98$  (скальный грунт)

требуется  $N=1000$  слагаемых стандартного ряда и  $N=10$  в программе ZYM. В задаче 3 сопротивление стержня определяется в многослойной земле по рекуррентным формулам. Нам не удалось добиться высокой производительности решения этой задачи в скальном грунте. В задаче 4 рассматривается заземлитель в грунте с границами произвольной формы. По этой модели земли мы можем также решить задачу 3 и сделать вывод о достоверности и эффективности решения.

В задаче 5 строится частотная характеристика (рис.3).

В задаче 6 исследуем влияние частотно зависимого сопротивления стального стержня на его характеристики и возможность его упрощенного моделирования на эквивалентной частоте. В задаче 7 анализируется влияние нелинейной характеристики стального стержня. В задаче 8 учитывается нелинейность грунта из-за искрообразования при больших токах. Нерешенной остается задача 9, где параметры грунта зависят от частоты. В задаче 10 исследуем наведенное напряжение между двумя стержнями, расположенными в воздухе и в грунте.

В задаче 11 сравнивается входное сопротивление стержня, полученное расчетным путем и по уравнениям длинной линии. Для медного стержня длиной  $l=20$  м, радиусом  $R=1$  см в земле с  $\rho=100$  Ом·м на частоте  $f=25$  кГц получим  $Z_{\text{вх}}=5.89+j1.52$  Ом, а по программе ZYM  $Z=5.91+j1.44$  Ом. Погрешность 1%.

В задаче 12 ищем входное напряжение стержня (из предыдущей задачи) при воздействии биэкспоненты тока  $J(t)=m(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t})$ , где  $m=1.05$ ,  $\alpha=2123$ ,  $\beta=246100$ . Максимум напряжения при единичной амплитуде тока (импульсное сопротивление): по уравнениям длинной линии 5.835, по программе ZYM 5.82. Погрешность 1%.

В задаче 13 исследуем волновые процессы в уединенном стержне длиной 300 м, расположенном в воздухе. Наблюдаем известные процессы отражения волн. Решение анимировано.

В задаче 14 стержень расположен в земле. Распространение волн напряжения и тока подчиняется уравнению диффузии. Решение анимировано.

Задача 15 позволяет исследовать производительность программы. Для расчета квадратного заземлителя со стороной 100 м и сеткой с шагом 2 м (число элементов 5100) потребуется:  $t=11$  сек на постоянном токе и  $t=20$  сек на частоте  $f=50$  Гц. На частоте  $f=25$  кГц дополнительно учитываем взаимную индуктивность между стержнями, тогда  $t=32$  сек. На частоте  $f=1$  МГц учитываем взаимные емкости стержней, тогда  $t=48$

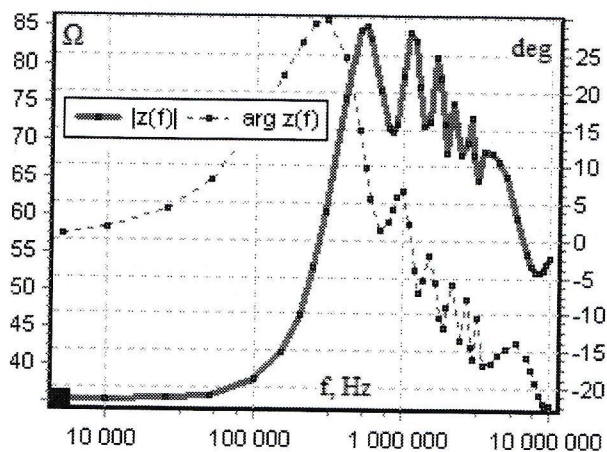


Рис. 3. Частотная характеристика импеданса медного горизонтального стержня длиной 50 м, диаметром 20 мм, глубиной погружения 1 м в грунте с  $\rho=1000$  Ом·м,  $\epsilon=30$

сек. Расчет импульсного процесса (с учетом индуктивности и емкости) происходит быстрее минуты. Компьютер: Intel Core i7, 4x2.2 ГГц, ОЗУ 6 Гб.

Перечень тестовых задач может быть продолжен.

**Применение программы ZYM.** Выберем молниезащиту электрической подстанции и на основе компьютерного моделирования определим последствия удара молнии. Зоны ориентировки молнии и молниезащиты изображены на (рис.4,5). Для чертежа оставляются зоны защиты на высоте электрооборудования, зданий, шин на виде сверху. Контур на уровне земли дает площадь сбора молниевых разрядов для расчета частоты попадания молнии в объект. И так, молниеотводы перехватывают удары молнии. Далее моделируем удар молнии поочередно в каждый молниеотвод и находим распределение потенциала и тока. Анимация позволяет рассмотреть процесс в динамике и детализировать для любого момента времени (кадра). По графику потенциала убеждаемся в отсутствие обратных перекрытий с

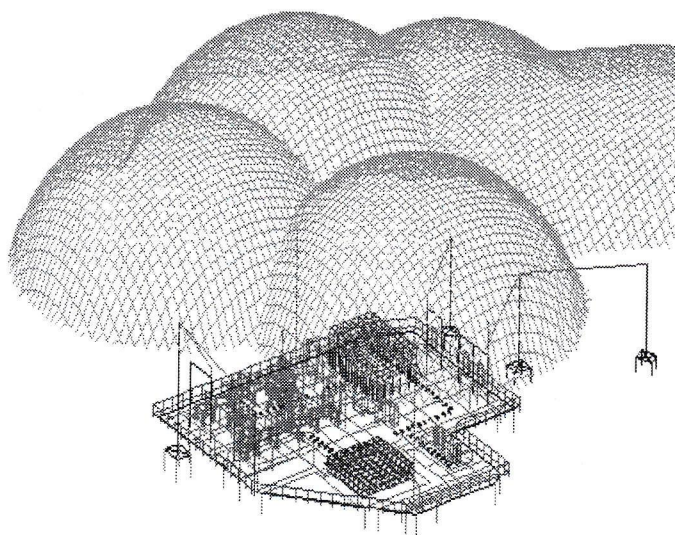


Рис.4. Зона ориентировки молнии по методу катящейся сферы

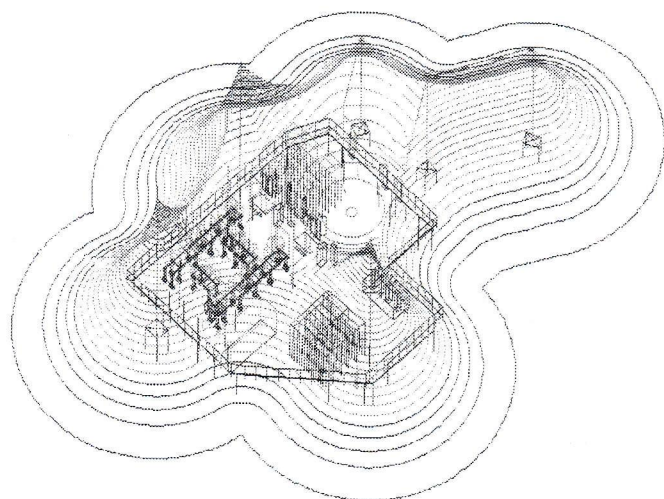


Рис.5. Зона защиты молниеотводов по методу катящейся сферы

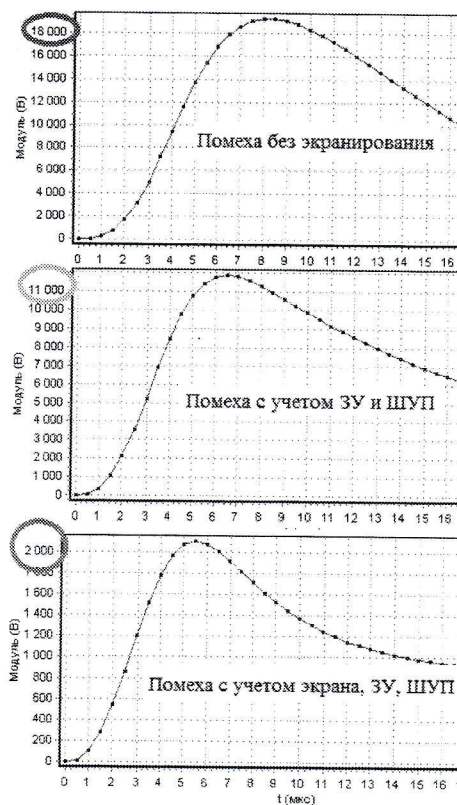


Рис. 6. Кондуктивные помехи

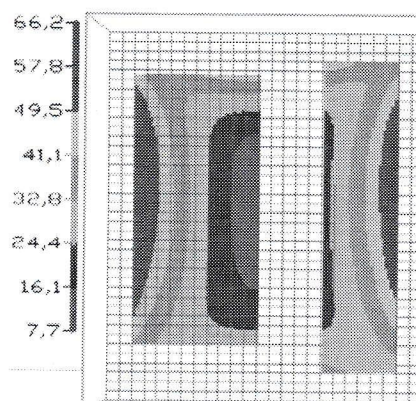


Рис.7. Напряженность магнитного поля в здании с учетом экранирования стенами при токе молнии 100 кА, частотой 25 кГц

молниеотводов на электрооборудование. В противном случае корректируем расположение молниеотводов. Максимум напряжения, приложенного к экрану контрольного кабеля не должен превышать допустимую величину (рис.6). В противном случае, усиливаем экранирующий эффект кабельного канала. Напряженность магнитного поля в местах расположения микропроцессорной аппаратуры (с учетом объемного экранирования металлоконструкциями) не должна превышать допустимый уровень (рис.7). В противном случае корректируем расположение молниеотводов, усиливаем экранирующий эффект кабельных каналов и металлоконструкций зданий, используем аппаратуру с повышенным классом помехоустойчивости.

Вывод. Компьютерные программы, работающие со сложными геометрическими моделями, следует разрабатывать как AutoCAD-приложения. Программа ZYM – удобный инструмент для проектировщика молниезащиты и заземления в задачах электробезопасности и ЭМС.

### Литература

1. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С. Компьютерная программа ZYM. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013613343. 02 апреля 2013.
2. Шишигин С.Л., Мещеряков В.Е., Шишигин Д.С. Математические модели и методы в задачах заземления и ЭМС. IV Российская конференция по молниезащите. 2014.
3. Шишигин С.Л., Мещеряков В.Е. Ориентировка молнии и молниезащита по Г.Н. Александрову. IV Российская конференция по молниезащите. 2014.

А.Н.Данилин, В.В.Ивонин, Д.В.Куклин

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОДЗЕМНЫХ ПРОВОДНИКАХ

Результаты исследований высоковольтных импульсных процессов в подземных проводниках нами были представлены на конференции 2012 года, ряде сборников и в фундаментальных трудах [1, 2, 3, 4, 5, 6]. В статье приводятся материалы исследований полученных за последние два года, которые являются продолжением работ по данной тематике. Опыты проводились в ограниченных объемах грунта и на открытом полигоне.

### I. Исследования процессов искрообразования в ограниченном объеме грунта

Исследования выполнены на опытной установке, приведенной на рис. 1 (бак с грунтом размером 500х400х400 мм, увлажненный песок, размеры зерен 0 - 0,5 мм)

Выполнена серия сравнительных опытов по изучению искровых процессов в грунте в зависимости от длительности импульсного воздействия и степени однородности электрического поля вокруг электродов в грунте. Длительность импульса регулировалась скоростью затухания экспоненциального импульса путем включения параллельно нагрузке резисторов  $R$ , при этом постоянная времени разряда составляла.

$$\tau = R \cdot C$$

Измерения токов в подземном проводнике и напряжения на нем выполнялось цифровым осциллографом типа АК ИП-4113/2. Полная генераторно-измерительная схема, подключенная к нагрузке - электроду в грунте, приведена на рис. 2.