

УДК 621.311

## Использование программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе

**В.Н. Селиванов**

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,  
Апатитский филиал МГТУ, кафедра электроэнергетики*

**Аннотация.** В статье проведен краткий обзор программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР и графического препроцессора ATPDraw. Рассмотрена возможность использования программного комплекса в образовательном процессе МГТУ при подготовке специалистов-электроэнергетиков.

**Abstract.** A brief survey of the electromagnetic transient program ATP-EMTP and graphical preprocessor ATPDraw has been presented in this paper. The possibility of using the program in the education of energy power engineer has been examined.

### 1. Введение

В современную науку и систему высшего образования широко и ускоренными темпами внедряются информационные технологии и компьютерная техника. Внедрение новых цифровых технологий в образовательный процесс повышает качество образования, компьютер позволяет совместить теорию и практику в единое целое. Высшее электротехническое образование также должно отвечать современным требованиям применения информационных технологий, будущий инженер обязан ориентироваться в современном программном обеспечении электроэнергетики, владеть основными приемами работы с программами расчета процессов в электроэнергетических системах по профилю своей подготовки. В Апатитском филиале МГТУ студенты специальности "Электроэнергетика" изучают дисциплины "Программное обеспечение в электроэнергетике" и "Математические задачи энергетики", основная задача которых – сформировать у студента целостное представление о принципах построения и функционирования современных программных средств, реализующих моделирование процессов в электроэнергетике.

В учебном процессе могут использоваться программы, которые условно можно разделить на три типа:

- специализированные математические комплексы для научных и инженерно-технических расчетов (Mathcad, MatLab, Maple, MuPAD, GNU Octave, Scilab, Maxima и др.);
- программы для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических полей методом конечных элементов (ANSYS, ELCUT, Femlab, FEMM, FlexPDE и др.);
- программы для моделирования процессов в электрических цепях и сетях (NI Multisim, Simulink, EMTP-RV, АТР-ЕМТР, MicroTran, RTDS Simulator, PSCAD-EMTDC и др.).

Математические пакеты позволяют связать математику как общетеоретический курс с ее практическими применениями в работе специалиста в области электроэнергетики и дать конкретный математический аппарат для прикладных исследований, сформировать у студента представление о методах решения электроэнергетических задач на ЭВМ, расширить представления студентов о моделировании как методе научного познания. При изучении дисциплины "Математические задачи энергетики" студенты АФ МГТУ осваивают Mathcad – удобную вычислительную среду для самых разнообразных математических расчётов и документирования результатов работы.

При подготовке специалистов в МГТУ большое внимание уделяется естественнонаучным дисциплинам, связанным с исследованием и расчетом сложных физических полей. Студенты электротехнических специальностей изучают курсы "Теоретические основы электротехники", "Техника высоких напряжений", "Электромагнитная совместимость" и т.п. Эти дисциплины предполагают изучение электромагнитных полей. Теплоэнергетики исследуют температурные, гидро- и аэродинамические поля. В курсах "Теоретическая механика" и "Сопротивление материалов" есть необходимость исследования полей напряжений и деформаций. Развитие ЭВМ и внедрение их во все области науки и техники привело к широкому применению численных методов решения задач математической физики, к которым относятся и задачи теории поля. Одним из универсальных методов решения краевых задач является метод конечных элементов (МКЭ). В настоящее время существует большое количество программных комплексов конечно-элементного моделирования. Самая известная

система Ansys стала промышленным стандартом. Появились также отечественные разработки, например, программа ELCUT фирмы Top. Эти программы применяются промышленными предприятиями, что обуславливает их высокую стоимость. Даже академические и образовательные версии этих комплексов достаточно дороги. Существующие бесплатные ознакомительные версии программ часто имеют функциональность, недостаточную даже для учебных целей. Однако существует также большое количество бесплатных аналогов, которые, несомненно, уступают в функциональности и точности, но обеспечены мощной технической поддержкой, но вполне могут применяться в учебных целях.

В рамках данной статьи основное внимание будет уделено последнему типу программ, а конкретно – программному комплексу АТР-ЕМТР. Выбор именно этой программы обусловлен важнейшим преимуществом АТР – бесплатностью, причем это преимущество достигнуто не в ущерб функциональным возможностям комплекса.

## 2. Обзор возможностей программы АТР-ЕМТР

При исследовании работы существующих электрических сетей, а также проектировании новых, возникает ряд задач, связанных с проведением расчетов процессов и режимов эксплуатации как отдельных компонентов сети, так и энергосистемы в целом. Наиболее традиционными являются следующие задачи:

- анализ режимов короткого замыкания в сети;
- расчет потоков электроэнергии и нагрузок;
- анализ устойчивости;
- анализ электромагнитных переходных процессов.

Наиболее сложным и в то же время наиболее общим является вопрос расчета переходных процессов в электроэнергетической системе вообще и в отдельных электрических сетях и их компонентах в частности. При анализе эксплуатационных или аварийных режимов сети необходимо учитывать различного рода коммутации, возмущения и временные изменения параметров электрооборудования и связанные с этим изменения токов и напряжений, в общем случае носящие нелинейный характер. После постановки задачи и построения эквивалентной электрической схемы, корректно описывающей процессы при заданных условиях, необходимо произвести расчет возникающих в цепи сигналов. При моделировании сложных электрических цепей совершенно естественным, а иногда и единственным методом расчета является компьютерный, с использованием вычислительной техники. Отечественные исследователи традиционно используют самостоятельно написанные на языках высокого уровня программы, ориентированные на решение узкоспециализированных задач, причем использование этих программ зачастую требует высокой квалификации на уровне авторов программного продукта. Такой подход оправдан при проведении разовых нетиповых расчетов, так как обеспечивает большую гибкость и эффективность численного моделирования, позволяет учитывать тонкие особенности конкретной проблемы, а также сохранить приоритет авторов на модель и результаты расчетов.

Проведение типовых расчетов с использованием стандартных компонентов удобно осуществлять с помощью программ, снабженных графическим интерфейсом и поставляемых в комплекте с библиотеками стандартных компонентов электрических сетей. В настоящее время во всем мире исследователи-электроэнергетики широко используют программу расчета электромагнитных переходных процессов ЕМТР (ElectroMagnetic Transient Program) и ее некоммерческую версию АТР (Alternative Transient Program).

ЕМТР – универсальная система программирования для цифрового моделирования переходных явлений как электромагнитного, так и электромеханического характера. С помощью этой программы могут моделироваться сложные сети и системы управления произвольной структуры. ЕМТР используется для анализа коммутационных и грозовых перенапряжений, исследования координации изоляции и вращательных колебаний электрических машин, моделирования релейной защиты и гармонического анализа, изучения проблем качества электроэнергии и электромагнитной совместимости и т.д.

Программа ЕМТР была разработана более сорока лет назад Г. Доммелем (Hermann W. Dommel) при поддержке федеральной энергетической компании ВРА (Bonneville Power Administration, США) и с тех пор непрерывно совершенствуется. В 1982 году ВРА было принято решение о коммерциализации проекта и создана группа координации разработчиков DCG (EMTP Development Coordination Group). Результатом работы этой группы стала коммерческая программа DCG EMTP, текущая версия которой называется EMTP-RV ([http://www.emtp.com/software/emtp\\_rv.html](http://www.emtp.com/software/emtp_rv.html)).

Некоторые разработчики не согласились с новой моделью распространения программы, покинули в 1984 г. этот проект и занялись разработкой некоммерческой версии ЕМТР – АТР (<http://www.emtp.org>). Программа была полностью написана на алгоритмическом языке Фортран и распространяется в нескольких версиях, отличающихся используемым компилятором: GNU Mingw32

или Watcom для Windows 95/98/NT/2000/XP/Vista; Salford для MS-DOS, MS-Windows 3.x/95/98; GNU Fortran для Linux.

Из-за особенностей законодательства США в области авторских прав и взаимоотношений разработчиков ATP с группой DCG EMTP отсутствует свободный доступ к исходным файлам кодов программного комплекса. Тем не менее, программа является бесплатной и в настоящее время все желающие, на определенных условиях, могут бесплатно получить лицензию на использование программы ATP. Существует несколько региональных групп пользователей ATP-EMTP: в Северной и Южной Америке, Европе, Японии, Австралии, Корее, Китае, Южной Африке и Индии. Российские пользователи могут стать авторизованными пользователями, присоединившись к Европейской группе пользователей (EEUG, <http://www.eeug.org>), заполнив форму лицензионного соглашения по адресу <http://www.emtp.org/eeuglic.html>.

ATP-EMTP активно используется в учебном процессе во многих университетах мира, однако студенты не могут стать авторизованными пользователями программы. Каждый студент получает от преподавателя, являющегося авторизованным пользователем ATP, временную лицензию, срок действия которой ограничен сроком изучения программы в рамках конкретного курса. Лицензионное соглашение для студентов можно получить по адресу [http://www.eeug.org/eeug/forms/ATP licensing agreement for students.pdf](http://www.eeug.org/eeug/forms/ATP%20licensing%20agreement%20for%20students.pdf).

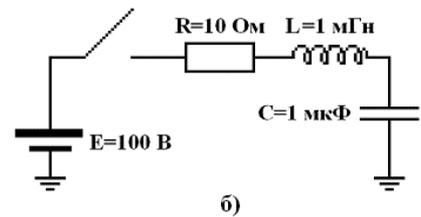
При использовании программы ATP для расчета переходных процессов в электрической цепи необходимо создать структурированный текстовый файл с описанием параметров входящих в цепь элементов и соединений между ними, опций численного метода и формата выходных данных, которые необходимо анализировать после проведения расчета. Структура файла содержит строго определенные поля для ввода различной информации. Сформированный файл является файлом исходных данных для головной программы, производящей численное интегрирование методом трапеций системы дифференциальных уравнений, составленных для схемы замещения электрической цепи.

На рис. 1а приведен пример входного файла для переходного процесса в последовательном RLC контуре (рис. 1б). Решение задачи осуществляется выполнением программы ATP-EMTP в режиме командной строки, например `C:\EEUG\WatATP98\TpbigW.exe имя_входного_файла`. Результатом работы программы является выходной файл с расширением \*.pl4, содержащий в нашем случае значения напряжения на емкости как функции времени. Для просмотра результатов в графическом виде разработчиками группы ATP создан ряд программ (GTPPLOT, PlotXY, WPCPlot и др.), позволяющий не только строить графики полученных сигналов, но и производить цифровую обработку данных. На рис. 1в представлены результаты расчета напряжения на емкости, полученные с помощью программы PlotXY.

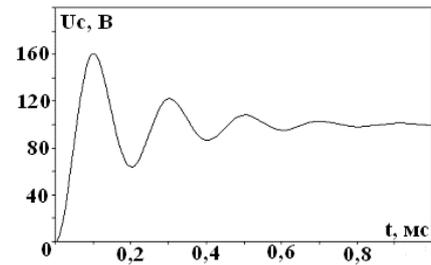
```

BEGIN NEW DATA CASE
C dT << Tmax << Xopt << Copt >
  1.E-6 .001
  500 1 1 1 1 0 0 1 0 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B >< Leng><><>0
  XX0002XX0003 10. 0
  XX0003XX0004 1. 0
  XX0004 1. 0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top><Tde >< Ie >< Vf/CIOP >< type >
  XX0001XX0002 -1. 1.E3 0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
  11XX0001 0 100. -1. 1.E3
/OUTPUT
  XX0004
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```

а)



б)



в)

Рис. 1. Пример файла исходных данных для программы ATP-EMTP

Входной файл содержит информацию об узлах схемы замещения электрической цепи и элементах в ветвях, включенных между этими узлами. Имена элементов соответствуют символьным ссылкам на библиотеку элементов программы.

Библиотека включает большое количество стандартных устройств электроэнергетических сетей, в том числе:

- линейные  $R, L, C$  элементы и их комбинации;
- линии электропередачи и кабели с распределенными и частотнозависимыми параметрами;
- нелинейные сопротивления и нелинейные индуктивности, в том числе с гистерезисом;
- трансформаторы, в том числе идеальные и насыщающиеся с гистерезисной характеристикой, однофазные и трехфазные с различными схемами включения обмоток и конструкций магнитопровода;
- коммутационные элементы с различными управляющими характеристиками;
- разрядники и варисторы с управляемой степенью нелинейности;
- нелинейные ключевые элементы (диоды, тиристоры и динисторы);
- источники энергии, в том числе постоянные, гармонические и импульсные широкого спектра характеристик;
- вращающиеся электрические машины (постоянного и переменного тока, однофазные и многофазные, синхронные и асинхронные).

Кроме того, пользователь может создавать свои собственные компоненты и модули, используя либо язык GPD (General-Purpose Description Language – универсальный язык описаний), поддерживаемый многочисленными моделирующими программами, либо Fortran-подобный язык.

### 3. Графический препроцессор ATPDraw

Создание файла входных данных требует глубокого знания формальных правил и постоянного контроля над корректностью вводимых данных, что является достаточно сложной задачей для неподготовленного пользователя, ставящего перед собой цель сосредоточить основное внимание на исследовании характера процессов в электрической сети, а не на изучении особенностей поведения программы при допущенных им ошибках. В помощь таким неискушенным пользователям была создана программа ATPDraw (<http://www.elkraft.ntnu.no/atpdraw/>) – графический препроцессор для программы ATP. Эта программа имеет удобный графический пользовательский интерфейс в стиле MS Windows и поддерживает режим drag'n'drop. Программа позволяет создавать схемы замещения электрических цепей и электроэнергетических сетей с использованием всех доступных в ATP библиотечных элементов, представляемых в графическом изображении, понятном любому специалисту в области электроэнергетики. На основе построенной схемы электрической цепи препроцессор ATPDraw создает корректный входной файл для программы ATP, запуск которой возможен непосредственно из данной графической среды разработки. Кроме того, из ATPDraw возможен запуск программ анализа выходных данных, полученных в результате расчета, таких как GTPPLOT, PlotXY, WPCPlot, специально созданных для построения графиков сигналов, рассчитанных программой ATP-EMTP. Таким образом, ATPDraw является интегрированной средой разработки электрических схем для исследования переходных и установившихся режимов работы электроэнергетических систем и именно эту программу изучают студенты в рамках дисциплины "Программное обеспечение в электроэнергетике".

Главное окно программы имеет стандартный вид приложений MS Windows (рис. 2).

Пункт меню **File** обеспечивает стандартные возможности работы с файлами (Создать, Открыть, Закрывать, Сохранить, Печатать и т.д.), а также специфичные для ATPDraw возможности импорта и экспорта схем и их участков, а также сохранение схемы в виде векторной картинке формата \*.wmf. Рабочие файлы программы являются архивами, содержащими все объекты рабочего проекта: схему электрической цепи, модули-подпрограммы, библиотечные функции и т.д.

Пункт **Edit** обеспечивает широкие возможности редактирования схемы электрической цепи: манипуляции с отдельными элементами и целыми участками цепи, создание подписей, а также формирование комплексных объектов с помощью группировки связанных элементов электрической цепи.

Пункты меню **View**, **Windows** и **Help** также являются стандартными для большинства Windows-приложений и не требуют подробных объяснений.

Пункт **ATP** используется для расчета уже созданного проекта, поэтому рассмотрим его позже. С помощью пункта меню **Library** пользователь может создавать новые элементы и модели электрической цепи с требуемыми свойствами и отсутствующие в библиотеке программы (**New object**), а также редактировать библиотеку (**Edit object**). Подпункт **Synchronize** позволяет заменить растровые иконки элементов, применявшиеся в старых версиях программы, на векторные, допускающие масштабирование размеров.

Пункт **Tools** позволяет вызывать встроенные редакторы текстовых и растровых файлов. Подпункт **Options** вызывает диалоговое окно установки глобальных параметров программы ATPDraw. Внесенные изменения сохраняются выбором подпункта **Save options**.

Некоторые пункты меню продублированы кнопками на панели инструментов, а также могут быть вызваны сочетанием "горячих" клавиш.

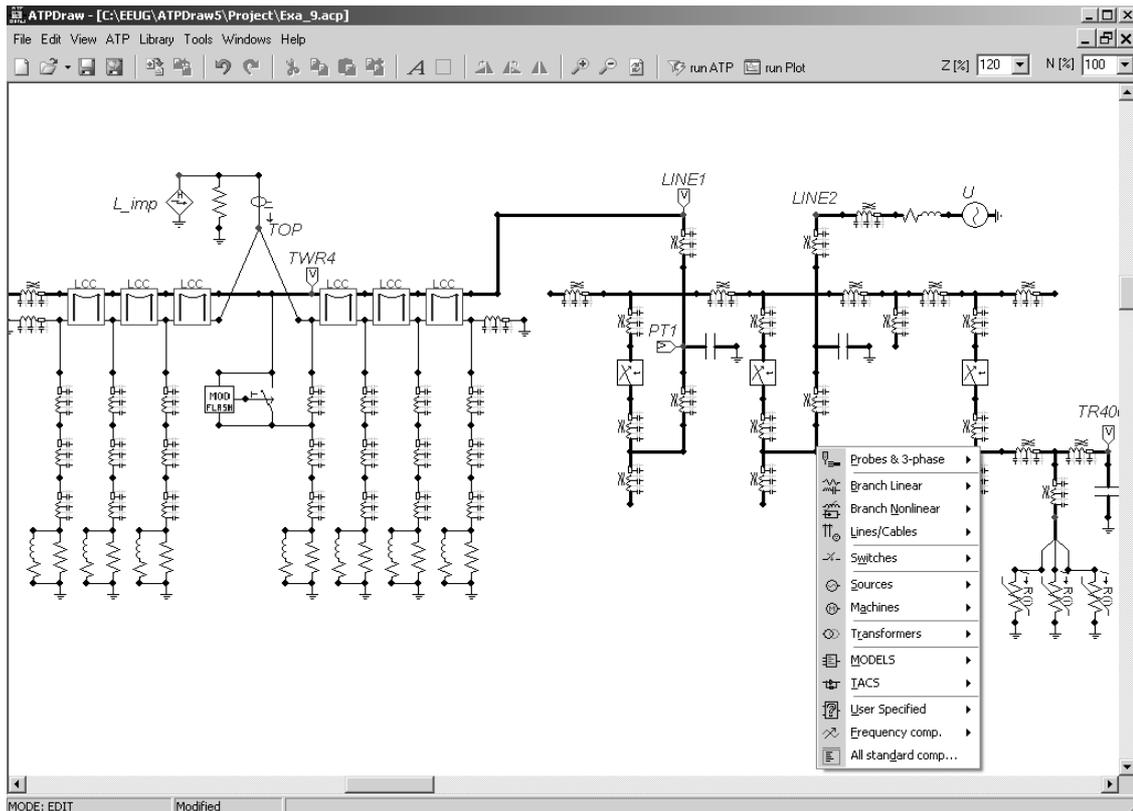


Рис. 2. Внешний вид главного окна программы ATPDraw

После создания пустого окна нового проекта можно начинать формирование схемы электрической цепи. Нажатие правой кнопки мыши в пустом окне вызывает диалоговую панель для выбора элемента электрической цепи (рис. 3).

Щелчком левой кнопки мыши производится вставка выбранного элемента в рабочее окно. Каждый элемент электрической цепи является многополюсником, выводы которого могут соединяться с выводами других элементов, причем выводы, а соответственно и соединения, могут быть однофазными или многофазными (в частности, трехфазными). Дальнейшее редактирование схемы сводится к манипуляциям с помощью мыши, причем реакция на нажатие кнопок мыши зависит от контекста операции. Например, нажатие правой кнопки на выделенном элементе приводит к его вращению, а если элемент не выделен, то вызывается диалоговое окно редактирования свойств этого элемента. Элементами схемы электрической цепи, наряду с библиотечными, являются также выводы многополюсников и соединения между ними, поэтому есть возможность редактировать также и их свойства. На рис. 4 в качестве примера показано диалоговое окно редактирования свойств и параметров трехфазного трехобмоточного трансформатора модели ВСТРАН.

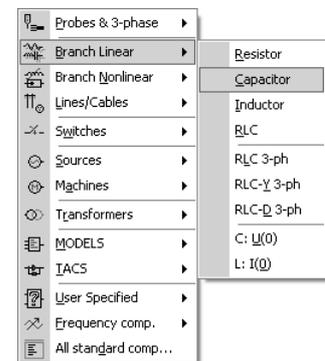


Рис. 3. Панель выбора элементов электрической цепи

После формирования схемы электрической цепи, задания свойств всех ее элементов, выбора точек измерения и характера регистрируемых сигналов выполняется расчет процессов. Для этого предназначен пункт меню **ATP**. С помощью подпункта **Settings** задаются основные параметры программы ATP-EMTP: опции численного метода, тип расчета, глобальные параметры элементов цепей, формат выходных данных, опции коммутаторов и вращающихся машин и т.д. Эти параметры явно указываются в соответствующих полях входного файла для программы ATP, который создается после выполнения команды **run ATP**. Входной файл можно посмотреть, а при необходимости и отредактировать с помощью подпункта **Edit ATP file**. Подпункт **Edit Commands** служит для создания пользовательских команд, например, для обработки или анализа результатов расчета посредством вызова внешних программ.

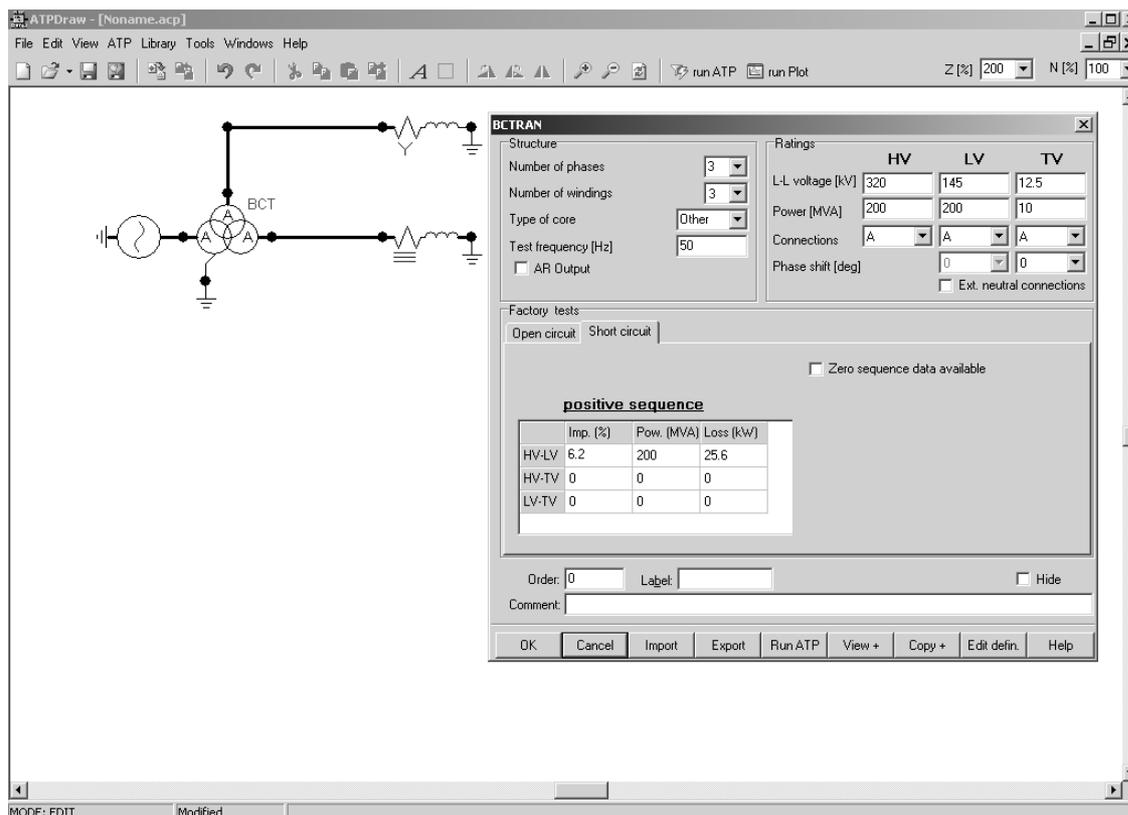


Рис. 4. Диалоговое окно редактирования свойств трансформатора модели BCTRAN

И, наконец, внешний вид меню программы можно настроить под собственные предпочтения с помощью подпункта **View – Toolbar Customize**.

Основной недостаток программы – англоязычный интерфейс и справочные материалы; локализация принципиально отвергается авторами программы для сохранения интернационального характера сообщества пользователей. Кроме того, автору статьи не удалось обнаружить каких-либо публикаций в отечественной литературе, посвященных описанию программного комплекса ATP-EMTP.

Опыт освоения пользователями программы ATPDraw показывает, что достаточно нескольких часов для овладения основными навыками работы при условии, что обучаемый знаком с теоретическими основами электротехники, принципами моделирования процессов в электрических сетях и осознает границы применимости тех или иных численных моделей элементов электрических цепей.

#### 4. Заключение

Программа расчета электромагнитных переходных процессов ATP-EMTP с графическим препроцессором ATPDraw являются удобным и достаточно мощным инструментом для анализа явлений в электрических сетях любой степени сложности. Данный программный комплекс можно рекомендовать для использования в учебном процессе электротехнических специальностей в высших учебных заведениях.