

УДК 621.313

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫХ РАСЧЁТОВ  
ТУРБОГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И НАГРУЗКИ**

*Милюх В.И., д.т.н., проф., Бадовский В.А., асп.*

*Национальный технический университет “ХПИ”, г. Харьков*

*61002 г. Харьков, ул. Фрунзе, 21*

*E-mail: [mvikpi@kpi.kharkov.ua](mailto:mvikpi@kpi.kharkov.ua)*

Наведений програмний комплекс, побудований на основі програми численних розрахунків електромагнітних полів в електричних машинах і скомпонованих із нею програм обслуговування й автоматизованого управління цими розрахунками. Комплекс призначений для численно-польових розрахунків електромагнітних параметрів турбогенератора в режимах холостого ходу та навантаження автоматизації

**Ключові слова:** численно-польовий розрахунок, турбогенератор, холостий хід, режим навантаження.

A programmatic complex, which built on the basis of the program of numerical calculations of the electromagnetic fields in electric machines, is presented. This numerical calculations is linked with program of services and automation of calculation's control. The programmatic complex is intended for the calculation of the run idle and the nominal load of turbogenerator.

**Key words:** numerically-field calculation, turbogenerator, run idle, load.

**Введение.** Известно, что уже существует целый ряд общедоступных и лицензионных программ, позволяющих выполнять численные расчёты магнитных полей в электрических машинах. Однако при использовании программных продуктов такого рода в процессе проектирования связующим звеном между его классическими этапами и численными расчетами магнитных полей, как правило, остается расчетчик-программист. Он фактически вручную переводит исходную конструкторскую документацию в графические модели, вводит исходные данные, запускает и контролирует работу программ, извлекает и обрабатывает результаты расчетов и т.д. И эти действия он вынужден многократно повторять при любых вариациях расчетных моделей. Такая рутинная работа занимает основное время и оказывается одним из слабых звеньев в процессе проектирования, которое, с развитием информационных технологий, на передовых предприятиях уже стало практически компьютерным.

Очевидно, что для ускорения процесса проектирования желательно максимально автоматизировать перечисленные выше рутинные этапы работы, также передав их компьютерам. Именно в этом направлении сориентирована представляемая здесь работа.

**Цель работы.** Создание программного комплекса, построенного на существующих программах численных расчетов магнитных полей и позволяющего максимально автоматизировать подготовительную, сопроводительную и итоговую работу при использовании этих программ в процессе проектирования электрических машин для расчета их электромагнитных параметров.

**Материал и результаты исследований.** Конкретной целью данной работы является представление одного из этапов на пути к глобальной цели,

а именно представление автоматизированного программного комплекса, предназначенного для численно-польовых расчетов электромагнитных параметров турбогенераторов в режимах холостого хода и нагрузки. Одним из важных вопросов создания программного комплекса явился вопрос выбора его составляющих – основных и обслуживающих программных средств.

Как известно, при расчете электромагнитных полей в устройствах с неоднородной сложной структурой получили распространение численные методы: метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ). Множество расчётов ТГ [1-4] было проведено МКР по собственным программам, написанным на языке программирования Turbo Pascal. Преимуществом этих программ является их внутренняя доступность с широкими возможностями вариаций при решении различных задач. Слабым же местом оказалась сложность автоматической реализации графических моделей различных электрических машин.

Новые перспективы численных расчетов магнитных полей открылись с появлением готовых программ со встроенными редакторами подготовки исходных данных для расчета магнитных полей в устройствах произвольной структуры. Их реализация, как правило, основана на использовании МКЭ, который считается более эффективным при наличии множественных границ раздела сред, не совпадающих с координатными линиями.

Окончательный выбор программы по решению полевых задач МКЭ в двумерных областях, соответствующих поперечному сечению электрических машин, был сделан в пользу программы FEMM [5], размещенной на общедоступном сайте <http://femm.foster-miller.net>. Реализация этой программы и ее интерфейса таковы, что пользователю

достаточно самых общих представлений о МКЭ. Благодаря встроенному в FEMM языку программирования Lua, стало возможным автоматизировать процесс непосредственно полевых расчётов: автоматически строить модель, варьировать данные в циклических расчетах, моделировать вращение ротора машины, рассчитывать магнитное поле, выдавать текущие и итоговые результаты и т.д.

В качестве управляющей программной среды был выбран алгоритмический язык Delphi [7], обладающий широкими возможностями расчетного, управляющего и интерфейсного характера. Таким образом, открылась возможность создавать полноценный программный комплекс. Управляющая программа, написанная на Delphi с привычным обычному пользователю «оконным» интерфейсом, вызывает FEMM и запускает в ней необходимый Lua-алгоритм. В итоге работа пользователя сводится к вводу чисел в определенные «окна» и нажатию предусмотренных кнопок.

Для функционирования программного комплекса требуется выполнение несколько условий. Первое – наличие современной Windows операционной системы, второе – исполнительный файл самой Delphi-программы, третье – установленная программа FEMM версии не ниже 4.0.1. Ещё требуется изменить в настройке операционной системы стандартный для нашего региона разделитель целой и дробной части «запятая» на «точка». Соответственно, в дальнейшем все дробные числа необходимо будет вводить, используя «точку».

Программа анализа режима холостого хода (XX) ТГ. Анализ этого режима традиционен для исследования ТГ. Поэтому первой программой стала программа автоматизированного численно-полевого анализа именно режима XX ТГ.

Программа позволяет решать пять последовательных задач: 1) создание расчетной модели ТГ, 2) расчёт тока XX при заданном номинальном напряжении, 3) расчёт характеристики холостого хода (XXX), 4) вычисление соответственно [4] мгновенных значений магнитного потокосцепления (МПС) полуфазы обмотки статора в различных ее положениях на половине периода изменения МПС, 5) разложение в ряд Фурье функции МПС или ЭДС по найденной в п. 4 угловой функции МПС [4].

В программе предусмотрено множество проверок и подсказок, которые фактически исключают заведомо ложные последовательности расчётов.

После первого нажатия на исполнительный файл программы возникнет панель, внешний вид которой, представлен на рис. 1. Поле каждого расчета визуально выделено рамкой и содержит набор доступных для изменения входных данных, кнопку расчёта и в некоторых случаях элементы, показывающие результаты текущего расчёта. Кроме того, в каталоге с исполнительным файлом будет создан подкаталог для хранения промежуточных файлов и результатов расчётов.

Первый этап называется «1 Построение геометрии». Изначально в программу заданы геометрические параметры рассматриваемого ТГ. К основным параметрам ТГ, используемым при расчете магнитного поля, относятся: радиус ротора; немагнитный зазор; расчетная длина; внешний диаметр сердечника статора; число пазов делений ротора; число обмотанных пазов ротора; число пазов статора; число пазов на полюс и фазу статора; число параллельных ветвей обмотки статора; схема обмотки статора – «звезда» или «треугольник»; относительное укорочение шага этой обмотки.

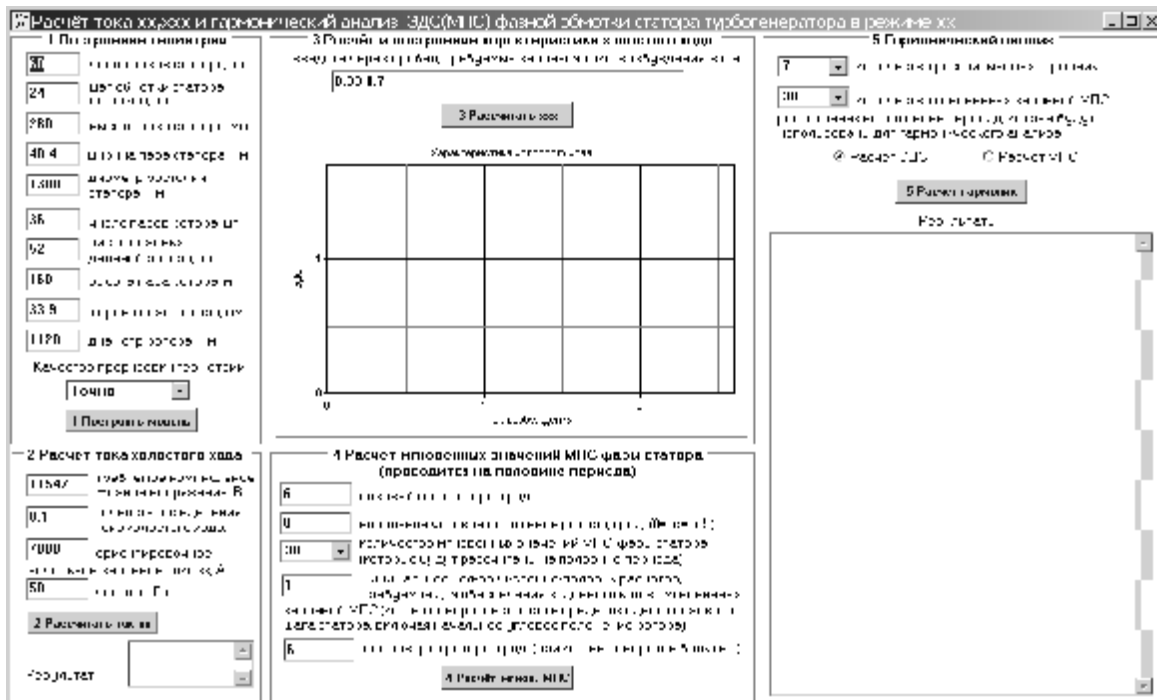


Рисунок 1 – Внешний вид программы по расчёту XX

Пример расчетной модели ТГ мощностью порядка 325 МВт в его поперечном сечении представлен на рис. 2.

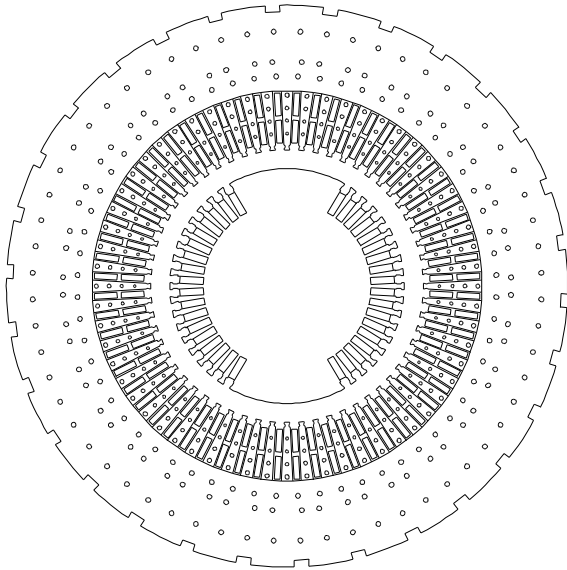


Рисунок 2 – Расчетная модель ТГ с точным представлением элементов

При желании пользователь может в небольших пределах изменить число пазов статора, шаг обмотки статора по пазам, диаметр расточки статора, число пазов ротора, число пазовых делений ротора, диаметр ротора, высоту и ширину пазов ротора и статора. Кроме того, добавлена возможность выбора качества детализации прорисовки геометрии сечения статора и ротора. Можно выбирать из следующих вариантов: «Грубо», «Грубо статор», «Грубо ротор» и «Точно», что влияет на детализацию воссоздания клиновидной области пазов статора и ротора, а также вентиляционных отверстий статора. В результате существенно меняется количество узлов конечно-элементной сетки, что отражается на времени почти всех последующих расчётов, поскольку все этапы, кроме последнего, непосредственно используют геометрическую модель.

Второй этап называется «2 Расчёт тока холостого хода». Для этого расчёта надо ввести номинальное значение фазного напряжения статора, точность определения тока ХХ и ориентировочное начальное значение тока ХХ. Нажатием кнопки «2 Рассчитать ток хх» вызывается FEMM-модель и произведётся численный расчёт магнитного поля, после которого по найденным МПС обмотки статора будет определена её ЭДС [1,4]. В зависимости от результата будет подбираться новое значение тока возбуждения, проводится новый численно-полевой расчёт, и так далее – пока не будет обеспечена необходимая точность. Значение тока возбуждения, предшествующее последнему численно-полевому расчету, и есть истинным. Оно выводится в соответствующую ячейку «окна» программы, а также будет сохранено в текстовом файле. Об окончании расчёта оповестит гудок.

Третьим, хотя и необязательным, этапом является расчёт и построение в о.е. характеристики холостого хода (ХХХ) для вводимого ряда значений тока возбуждения в относительных единицах. Результат расчёта ХХХ сохраняется в графическом и текстовом файлах.

На четвертом этапе проводится численно-полевой расчёт мгновенных значений МПС обмотки статора при автоматических последовательных поворотах ротора в заданных пределах с заданным шагом и с заданного углового положения, что соответствует изложенному в [2]. О завершении данного этапа также оповещает гудок.

Последний – пятый этап позволяет по результатам предыдущего этапа оценить гармонический состав кривой МПС или ЭДС статора [2]. Пользователь может выбрать количество рассчитываемых гармоник, количество обрабатываемых мгновенных значений МПС и вариант расчёта: МПС или ЭДС. После нажатия кнопки «5 Расчёт гармоник» в соответствующем поле будет показан результат: амплитуда первой гармоники, относительные амплитуды всех обрабатываемых гармоник и их начальные фазы, а также иная полезная информация, что будет сохранено в текстовом файле.

*Программа расчёта режима нагрузки ТГ.* Внешний вид панели данной программы представлен на рис. 3. Ее первый этап, по аналогии с программой для режима ХХ, заключается в построении геометрической расчетной модели ТГ.

Одной из основных целей данной программы является определение тока возбуждения  $I_E$ , обеспечивающего конкретно заданные напряжение  $U_s$  и ток статора  $I_s$ , а также фазовый сдвиг  $\varphi$  между ними. Соответственно будет обеспечена и активная заданная мощность ТГ [8]:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos\varphi.$$

Чтобы проводить полевые расчеты в режиме нагрузки, необходимо задавать ток возбуждения  $I_E$  и мгновенные токи в фазных обмотках статора [4,7]:

$$i_A = I_m \cos(\omega t - \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \beta);$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \beta),$$

где  $I_m$  – амплитуда тока;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота; момент времени  $t$ ,  $\beta$  – начальная фаза, определяющая сдвиг осей намагничивания обмоток ротора и статора.

А чтобы дать старт расчетам магнитного поля в режиме нагрузки, необходимы исходные приближения  $I_E$  и  $\beta$ . Они же являются одной из главных целей расчета – остальное определяется уже достаточно просто [1-4].

Таким образом, необходим итерационный процесс полевых расчетов, начальные значения указанных величин для которого обеспечиваются на втором этапе работы программы. Здесь используются классические подходы на основе [8], принцип реализации которых показан в [4,6].

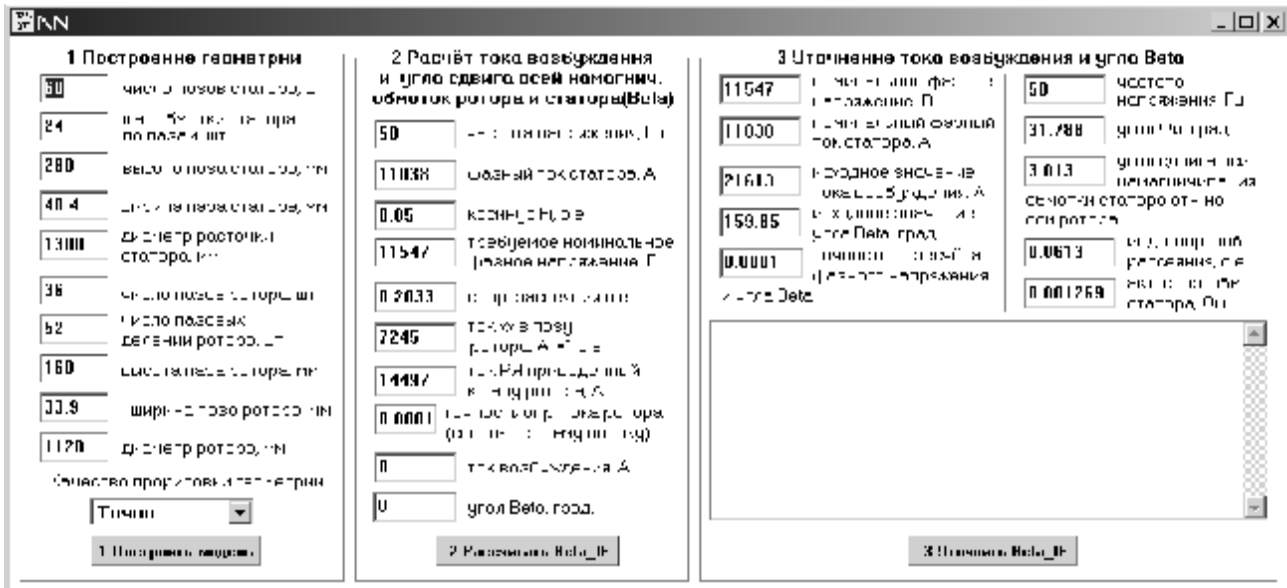


Рисунок 3 – Внешний вид программы расчёта режима нагрузки

В третьей части программы производится последовательное уточнение  $I_E$  и  $\beta$ , обеспечивающих достижение требуемых электрических параметров и мощности ТГ.

Здесь применен специально разработанный алгоритм построения итерационного процесса, позволивший значительно сократить количество циклов пересчета без какой-либо корректировки промежуточных данных пользователем. При этом последний может установить уровень точности, с которой будет обеспечены  $U_s$  и  $\phi$ . Заметим, что при полевых расчетах в прямолинейной части ТГ учитываются активное сопротивление обмотки статора  $R_s$  и индуктивное сопротивление лобового рассеяния  $X_l$ .

После серии численно-полевых расчётов в окне результатов будут финальные значения  $I_E$  и  $\beta$ , а также обеспечиваемые ими напряжение  $U_s$  и угол  $\phi$ . Помимо этого, будет сохранен текстовый файл с гармоническим анализом ЭДС обмотки статора, а также файлы данных для дальнейших расчётов и извлечения ряда электромагнитных параметров и характеристик ТГ.

Для проверки адекватности получаемых по этим программам результатов, был проведен ряд тестовых расчетов. Полученные значения сравнивались с аналогами, рассчитанными по классическим методам и показали высокую эффективность разработанного программного комплекса.

**Выводы.** Достоверность результатов расчётов, проведенных по описанным программам, подтверждена сравнением с традиционными методами. Несомненным плюсом этих программ является то, что их можно использовать для новых, ещё не освоенных конструкций ТГ, в отличие от классической системы проектирования, требующей в таких случаях длительной доводки ТГ и корректировки методик расчета. Разработанные расчетные подходы и программный комплекс позволяет обеспечивать

необходимые данные и условия для выполнения дальнейших этапов воплощения и совершенствования концепции численно-полевого программного обеспечения системы проектирования ТГ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехника і електромеханіка. - 2006. - № 2. - С. 40-46.
2. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ ЭДС в турбогенераторе на основе численных расчетов вращающихся магнитных полей в различных режимах // Электротехника і електромеханіка. - 2004.- № 4.- С. 46-51.
3. Милых В.И., Полякова Н.В. Численно-полевой анализ индуктивных сопротивлений рассеяния турбогенератора // Вестник НТУ «ХПИ». - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2005. - № 36. - С. 39-46.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехника і електромеханіка. - 2003. - № 4. - С. 59-64.
5. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, February 5, 2009. – [Электронный ресурс]. Режим доступа. <http://femm.foster-miller.net>, 2007.
6. Милых В.И., Бадовский В.А. Численно-полевой анализ эффективности векторных диаграмм турбогенератора // Вестник НТУ «ХПИ». - Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. - № 25.- С. 85-90.
7. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.borland.com>.
8. Вольдек А.И. Электрические машины. - Л.: Энергия, 1978.- 832 с.

Стаття надійшла 15.05.2009 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Некрасовим А.В.