

СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА МНОГОФАЗНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

А. П. Сарычев, М. Е. Коварский,
А. О. Сидоров, М. А. Егоров

Развитие регулируемых электроприводов на базе синхронных машин с постоянными магнитами потребовало создания расчетного средства, позволяющего решить задачи синтеза множества вариантов конструкций электрических машин и выбора оптимального варианта за короткий промежуток времени. Для выполнения этих задач с помощью технологии электронных таблиц разработано программное средство поверочного расчета многофазных синхронных машин с постоянными магнитами РМХЛ с использованием существующей аналитической методики. Описаны преимущества использования нового программного средства и намечены области его применения. Подробно рассмотрены особенности и возможности программного средства, показан ее интерфейс. Проведено сравнение характеристик рассчитанных вариантов синхронных машин с постоянными магнитами с характеристиками машин, рассчитанных на основе численных методов. Предложенный подход позволяет создавать расчетные средства для различных типов электрических машин. Дополнениями программы могут быть расчеты виброакустических, прочностных и тепловых характеристик.
Ключевые слова: программное средство расчета, технология электронных таблиц, синхронный двигатель с постоянными магнитами, аналитический метод расчета.

Эффективность программных средств расчета электрических машин и правильный их выбор являются одними из важнейших факторов, влияющих на конечные конструкторские и производственные решения. На сегодняшний день существует два подхода к проектированию любых типов электрических машин. Первый предполагает использование аналитических методов, являющихся синтезом формул из теории обобщенной электрической машины с эмпирическими данными, который считается менее точным, но более быстрым при применении алгоритмических средств вычисления. Второй подход связан с использованием численных методов расчета: моделирование реальных полей, ограниченных внешними условиями и геометрией, что дает более точное решение, но требует значительных затрат времени и ресурсов.

За последнее десятилетие АО «Корпорация «ВНИИЭМ» успешно разработало малозумные синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) для судовых регулируемых электроприводов с помощью затратных численных методов [1 – 4]. Для создания принципиально новых технических решений необходим поиск и анализ новых конструкций электрических машин на этапе эскизного проектирования.

Опыт разработки первых СДПМ показал, что для достижения этой цели необходимо использовать расчетные средства на базе аналитических методов, что при условии автоматизации расчетных операций позволяет за короткий промежуток времени получать множество решений с достаточной для начального этапа точностью.

Созданные в конце 1980-х годов программы расчета на электронной вычислительной машине (ЭВМ) были написаны с помощью императивных алгоритмов языка программирования *Fortran*. Это позволило существенно упростить вычислительные процессы и снизить затраты времени и ресурсов на поверочные расчеты. Однако для углубленного исследования новых машин эти программы не подходят, что объясняется сложностью описания отличительных особенностей конструкции этих машин, их принципиально новым исполнением, а также мощностью (скоростью) вычислительной техники того времени. Другими недостатками этих расчетных средств являются:

- Все исходные данные электромагнитного расчета вводятся в программу одним потоком, при этом расчет осуществляется в фоновом режиме без визуализации промежуточных этапов и без сигнализации об ошибках, возникающих при наличии неадекватных входных данных.

- Для запуска и корректной работы программных средств в современных операционных системах необходимы дополнительные программы-эмуляторы.

- Затруднен одновременный анализ нескольких вариантов конструкции при предварительной оценке габаритов и электромагнитных нагрузок СДПМ.

Современные вычислительные средства позволяют устранить указанные недостатки, повысить точность расчетов и уменьшить затрачиваемое время. Среди исследуемых электрических машин наиболее востребованными являются многоскоростные многофазные СДПМ (далее – ЭМ), для

которых предложены средства расчета.

Разработанный метод иллюстрируется на примере расчета электрических характеристик. Точно также будут добавлены блоки виброакустических, прочностных и тепловых характеристик.

В настоящей работе усовершенствованы: структура, алгоритмы и графическое представление переменных на всех этапах работы программы для поверочного расчета ЭМ. Математическая модель электромагнитного расчёта переведена в алгоритмы современного языка программирования *Visual Basic For Applications (VBA)*, реализующего объектно-ориентированный подход в среде приложения *MS Office Excel*. В качестве объектов выступают так называемая книга *Excel* и созданные в ней современные элементы управления формами (выпадающие списки, кнопки и т. п.), в качестве классов объекта – листы книги. Объекты ориентируются посредством событий классов, к которым в первую очередь относится обновление листа книги по принятии ввода данных ячеек.

При создании нового расчетного средства был проанализирован императивный код программы на языке *Fortran*, в котором были найдены ошибки, существенно влиявшие как на ее работоспособность (например, код допускал возникновение ситуации нештатного завершения работы программы и отказа при последующих ее запусках), так и на конечные результаты расчета в целом, и эти ошибки были устранены.

Новая программа реализована с помощью технологии электронных таблиц – использования ячеек электронной таблицы для проведения некоторых математических операций, хранения данных и компактного представления результатов. Более сложные математические задачи (например интерполяция кривых намагничивания) представляются с помощью программных модулей, реализованных на языке *VBA*. Такое индивидуальное расширение функциональных возможностей приложения *MS Excel*

позволило минимальными средствами создать полноценный расчетный комплекс [5].

Основным достоинством этой программы является загрузка исходных данных в многопоточном режиме, что дает возможность контролировать изменение значений всех промежуточных и итоговых результатов расчета при изменении всего лишь одного входного параметра и существенно уменьшает время поиска оптимального решения.

Новая программа, получившая наименование *Permanent magnet Excel (PMXL)*, может работать на любом персональном компьютере. Единственным ограничением является наличие установленного приложения *MS Office Excel* в русскоязычной версии не ниже 12.0 (2007).

Интерфейс программного средства *PMXL* представлен на рис. 1. Расчет выполняется по следующей схеме. Исходные данные о типе индуктора и конфигурации статора вводятся в начальном окне 1. Затем ввод заданных величин и известных характеристик ЭМ осуществляется в рабочем окне 3. После заполнения необходимого количества ячеек выполняется запуск расчета, ход выполнения которого контролируется с помощью индикаторного окна. Полученные выходные данные можно контролировать в рабочем окне. В случае необходимости для корректировки одной из величин изменяют исходные данные, а затем

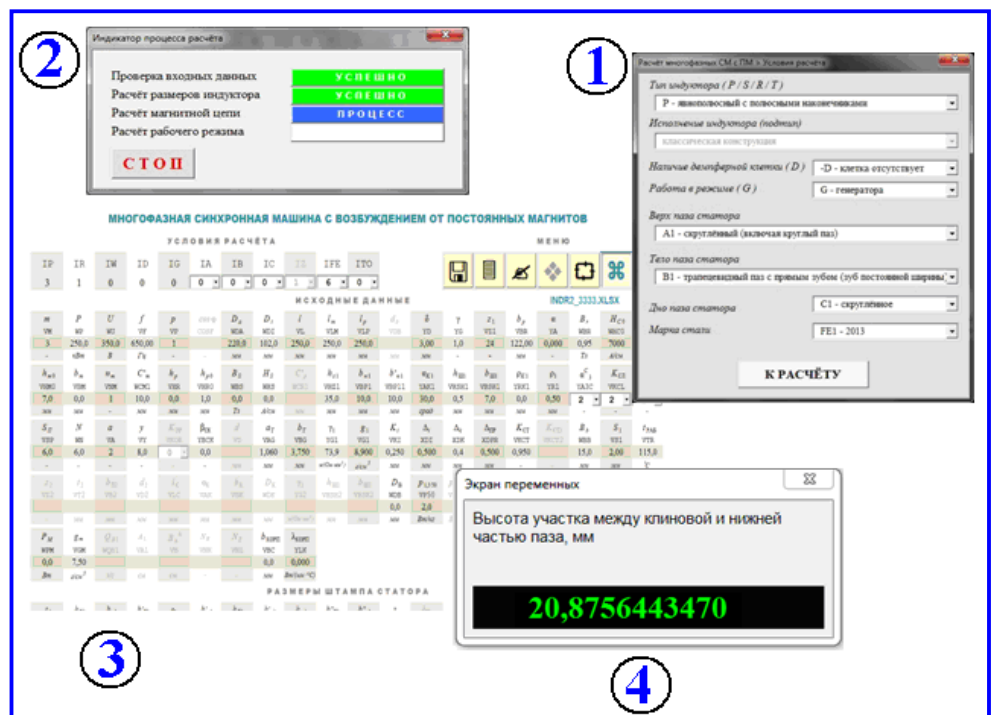


Рис. 1. Интерфейс программного средства PMXL:
 1 – окно ввода исходных данных; 2 – окно индикации процессов расчета;
 3 – рабочее окно с расчетными данными; 4 – экран переменных

ПЕЧАТАТЬ ОТЧЕТ		ОФОРМИТЬ НАЗАД		
ИНФОРМАЦИЯ О РАСЧЕТЕ				
Расчет выполнен	27.03.2019			
Дата	МТИ150-3000.xlsx			
Файл исходных данных				
РАБОЧИЙ РЕЖИМ ДВИГАТЕЛЯ				
Отношение напряжения к ЭДС холостого хода	1.069116951	1.069117	1.068852	1.056534
Котангенс внутреннего угла в режиме максимальной мощности	0.010810723	0.010811	0.010671	1.115255
Внутренний угол в режиме максимальной мощности	1.559960024	рад	1.559986	1.560126
Внутренний угол в номинальном режиме	0.461883069	рад	0.461883	0.468209
Продольная составляющая тока номинального режима	27.03801121	А	27.03801	28.51069
Поперечная составляющая тока номинального режима	267.9771954	А	267.9772	267.8585
Продольная составляющая ЭДС номинального режима	186.5674597	В	186.5675	186.1007
Поперечная составляющая ЭДС номинального режима	79.14654689	В	79.14655	79.11148
Ток номинального режима	269.3377643	А	269.3378	269.3715
Потери в меди при номинальном режиме	812.7527121	Вт	812.7527	812.9564
Потребляемая мощность номинального режима	157.2144658	кВт	157.2145	157.1841
Добавочные потери при номинальном режиме	2356.216967	Вт	2358.217	2357.761
Коэффициент мощности номинального режима	0.935428643		0.935429	0.935131
Фазовый угол, соответствующий коэффициенту мощности номинального режима	0.361328687	рад	0.361327	0.362169
Ток холостого хода	39.45101045	А	39.45101	38.82367
Коэффициент мощности режима холостого хода	0.168323908		0.168324	0.171532
ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО РЕЖИМА				
Коэффициент полезного действия	0.954110674		0.954111	0.954295
Плотность тока в обмотке статора	1.969964915	А/мм ²	1.969965	1.970212
Линейная нагрузка статора	226.9399582	А/см	226.94	226.9684
КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ ПАЗА. МАССА СЕРДЕЧНИКА				
Площадь пазов статора	2	мм ²	2	2
Площадь клиновидной части пазов статора	13.90836798	мм ²	13.90837	54.71362
Площадь средней части пазов статора	652.1708851	мм ²	652.1709	599.0258
Площадь нижней части пазов статора	15.27079633	мм ²	15.2708	15.2708
Площадь пазов статора в штампе	683.3500494	мм ²	683.35	671.0102
Площадь, занимаемая изоляцией в клиновидной части пазов статора	83.93453672	мм ²	83.93454	83.93454

Рис. 2. Форма отчета программного средства PMXL с тремя рассчитанными вариантами синхронных машин с постоянными магнитами

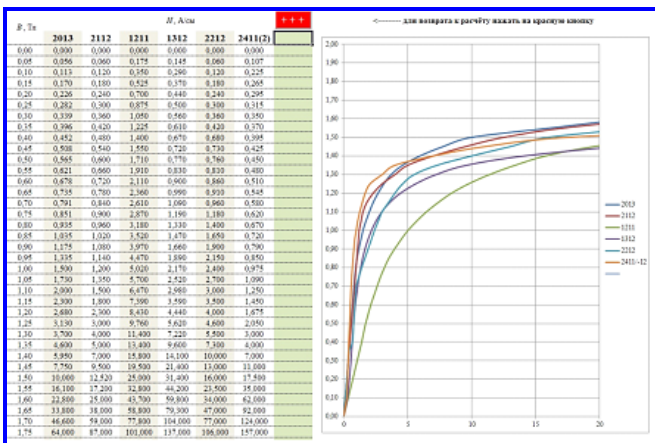


Рис. 3. Библиотека электротехнических статей программного средства PMXL

расчет проводится повторно. Окончательный вариант расчета сохраняется.

Помимо организации удобного ввода/вывода данных, графический интерфейс созданной программы позволяет контролировать в дочернем окне значения переменных, округленные до 10 – 20 знаков (в зависимости от разрядности целой части числа после запятой); при этом обозначения каждой переменной расшифровываются в том же окне 4. Другое дочернее окно демонстрирует прохождение стадии, на которой находится расчет в данный момент времени 2. Новой функцией программы PMXL является формирование отчета о проведенных вычислениях – пользователю предоставляется возможность выбора значений переменных, необходимых для вывода в печатном табличном виде (рис. 2). Каждый расчет сохраняется в виде файла

данных, и ранее проведенные расчеты составляют базу данных, которую затем удобно либо использовать как основу для новых расчетов, либо добавлять ранее полученные результаты к сравнению в отчете. Еще одна внедренная функция – отслеживание ошибок ввода данных, блокирующая расчет до их исправления.

Кроме этого в программе создана база электротехнических материалов, что позволяет использовать в расчете материалы, обладающие нелинейностью электрических и магнитных свойств, благодаря чему повышается точность проводимых расчетов (рис. 3). В программе предусмотрена возможность добавления новых электротехнических материалов с последующим анализом характеристик электрических машин. Для защиты программного кода и содержимого ячеек от случайных изменений выполняется авторизация с помощью пароля.

Результаты расчетов могут быть использованы для работы в других программных средствах, а также при проведении дальнейших исследований, например, гармонического анализа. Передача данных при этом осуществляется с помощью дополнительного пользовательского программного кода. В случае необходимости программа может быть дополнена и использована для решения узкоспециализированных задач: расчета надежности, динамики, прочности и виброшумовых характеристик электрических машин, теплового расчета и других задач.

Корректность работы PMXL подтверждается результатами расчета малошумного СДПМ мощностью 37 кВт. Расхождение результатов расчета параметров и измеряемых параметров электрической машины не превысило 5%, что доказывает возможность применения программы для расчета разрабатываемых ЭМ.

Заключение

Предложена концепция разработки программы, обеспечивающей не только достижение сформулированной сегодня цели, но и подразумевающей возможность дальнейшего расширения ее функциональных возможностей любым квалифицированным программистом и в любых целях, связанных с тематикой расчета. Применение программы PMXL позволяет максимально оперативно оценивать и предоставлять к сравнению результаты поверочных расчетов.

Литература

1. Электрические машины для специальных применений / Л. А. Макриденко, А. П. Сарычев, М. Е. Коварский [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – С. 16 – 21.

2. Результаты разработки нового поколения малошумных электроприводов герметичных электронасосов / М. Е. Коварский, Ю. Т. Портной, В. В. Магин [и др.] // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. АЭП-2012. – Иваново, 2012. – С. 276 – 279.
3. Регулируемые электроприводы герметичных корабельных насосов на базе синхронных машин с преобразователем для резервного электропитания от сети постоянного тока / В. М. Берестов, В. Ю. Волков, В. А. Клан [и др.] // Известия ТГУ. – 2010. – Вып. 3. – Ч. 2. – С. 185 – 191.
4. Исследование пульсаций электромагнитного момента синхронных машин с постоянными магнитами с целым и дробным значениями q / В. Я. Беспалов, М. Е. Коварский, А. О. Сидоров // Электричество. – 2018. – № 5. – С. 45 – 51.
5. Роман С. Использование макросов в Excel / С. Роман. – Санкт-Петербург : Питер, 2004. – 507 с.

Поступила в редакцию 22.06.2020

Алексей Петрович Сарычев, доктор технических наук, первый заместитель генерального директора, т. (495) 366-56-29.

Михаил Ефимович Коварский, кандидат технических наук, главный конструктор регулируемых электроприводов для ВМФ, т. (495) 366-15-61.

Антон Олегович Сидоров, кандидат технических наук, инженер 3-й категории, т. (495) 366-33-56.

Михаил Андреевич Егоров, инженер, т. (495) 366-24-01.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

DEVELOPMENT OF SOFTWARE TOOL FOR DESIGNING A MULTI-PHASE SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT-MAGNET EXCITATION

**A. P. Sarychev, M. E. Kovarskii,
A. O. Sidorov, M. A. Egorov**

The evolution of controlled electrical drives on the basis of synchronous machines with permanent magnets required the development of a design tool allowing the synthesis of multiple modifications of electrical machine designs and selection of an optimal modification within a short time period. To fulfil these tasks, software tool for designing multi-phase synchronous machines with permanent magnets PMXL has been developed on the basis of the electronic spreadsheet technology, with the use of analytical procedure. The advantages of using the new software tool are described, and fields of its application are specified. The features and capabilities of the software tool are fully considered, and its interface is shown. The comparison of the characteristics of the designed modifications of synchronous machines with permanent magnets with the characteristics of machines designed on the basis of numerical methods is presented. The suggested approach allows the development of design tools for different types of electrical machines. The program may be supplemented by calculations of vibro-acoustic, structural and thermal characteristics.

Key words: design software tool, electronic spreadsheet technology, synchronous motor with permanent magnets, analytical calculation method.

References

1. Electrical machines for special applications / L. A. Makridenko, A. P. Sarychev, M. E. Kovarskii [et al.] // Matters of Electromechanics. NPP VNIEM Proceedings. – Moscow : FSUE 'NPP VNIEM', 2008. – Pp. 16 – 21.
2. Results of development of a new generation of low-noise electrical drives for sealed electrical pumps / M. E. Kovarskii, Yu. T. Portnoi, V. V. Magin [et al.] // Proceedings of VII International (XVIII All-Russia) Conference on Automatic Electric Drives. AEP-2012. – Ivanovo, 2012. – Pp. 276 – 279.
3. Controlled electric drives of sealed ship pumps based on synchronous machines with a converter for standby power supply from DC mains / V. M. Berestov, V. Yu. Volkov, V. A. Klan [et al.] // Bulletin of Tomsk State University. – 2010. – Issue 3. – Part 2. – Pp. 185 – 191.
4. Study of pulsations of electromagnetic torque of synchronous machines with permanent magnets with integer and fractional q values / V. Ya. Bespalov, M. E. Kovarskii, A. O. Sidorov // Electricity. – 2018. – No. 5. – Pp. 45 – 51.
5. Roman S. Use of macros in Excel / S. Roman. – St. Petersburg : Piter, 2004. – 507 p.

*Aleksei Petrovich Sarychev, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.),
First Deputy Director General, tel.: +7 (495) 366-56-29.*

*Mikhail Efimovich Kovarskii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
Chief Designer of Controlled Electric Drives for Navy, tel.: +7 (495) 366-15-61.*

*Anton Olegovich Sidorov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
3rd Category Engineer, tel.: +7 (495) 366-33-56.*

*Mikhail Andreevich Egorov, Engineer, tel.: +7 (495) 366-24-01.
(JC «Corporation VNIEM»).*