

УДК: 629.7

## Конвертирование трехмерных компьютерных геометрических моделей для оптимизации параметров моделируемых устройств

А. Э. Аббасов

Финансово-технологическая академия,  
Информационно-технологический факультет,  
Россия, 141077, Московская обл., г. Королев, ул. Гагарина, д. 42

E-mail: alexn1smo@mail.ru

Получено 5 октября 2014 г.,  
после доработки 18 декабря 2014 г.

Данная работа посвящена применению метода построения и конвертирования трехмерных компьютерных геометрических моделей для оптимизации параметров моделируемых устройств. Метод использован при проектировании сложных технических устройств на примере компонентов системы управления рециркуляцией выхлопных газов автомобиля: электропривода клапана рециркуляции с магнитопроводом и электродвигателем. Трехмерные компьютерные геометрические модели созданы в среде «Компас-3D» и конвертированы в среду Maxwell-2D. В среде Maxwell-2D рассчитаны переходные электромагнитные процессы для последующей оптимизации параметров устройств системы рециркуляции по критерию снижения потерь мощности автомобильного двигателя.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, эффективность функционирования, управляющая зависимость

### Converting three-dimensional computer geometric models for optimization of simulated devices' parameters

A. E. Abbasov

*Financial and technological academy, Information Technology Department, FTA, Moscow region.  
Korolev, 42 Gagarin Str., 141077, Russia*

**Abstract.** — This work focuses on the application of a method of construction and conversion of three-dimensional computer models for optimization of geometric parameters of simulated devices. The method is used in design of complex technical devices for control system components of an exhaust gas recirculation vehicle — electric EGR valve with magnetic and electric motor. Three-dimensional geometric computer models were created in KOMPAS-3D environment and converted to Maxwell-2D. In Maxwell-2D environment transient electromagnetic processes for further optimization of parameters of the recirculation system device were calculated using a criterion of reducing power loss of the automobile engine.

Keywords: computer simulation, the efficiency of managing, the relationship

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 81–91 (Russian).

## Актуальность темы

В настоящее время широко используются информационные технологии 3D-моделирования для сокращения сроков проектирования сложных устройств. Применению технологий 3D-моделирования при системном анализе и автоматизации проектирования посвящены труды Шипунова А. Г., Юдаева А. В., Шуваева А. А., Сазанова Е. А. Проблемы проектирования оборудования сложных технических систем состоят в том, что существующие методы расчета и моделирования в различных компьютерных средах трудоемки. При использовании трехмерных геометрических моделей, позволяющих сократить время разработки на 10–15 %, задачи моделирования ограничены созданием презентационного графического материала для заказчика, анимационных роликов и отчетов, визуализацией технологического процесса сборки устройств (изделий), описанием процесса еще на предпроектной стадии.

При оценке эффективности использования программ трехмерного моделирования выявлены следующие недостатки при постановке задач моделирования. Эффективность использования программ 3D-моделирования обычно оценивается объемом презентационных материалов с требуемой степенью детализации проектируемого объекта (устройства), временем разработки проекта [Сазанов, 2014], количеством используемых базовых моделей из предварительно созданной базы данных для изменения значений их параметров в соответствии с данными геометрии устройств или заранее определенным способом [Шипунов, Юдаев, Шуваев, Кузнецов, Привалова, Махонин, 2008], степенью детализации для визуализации технологического процесса сборки.

Техническим результатом использования программ трехмерного моделирования в процессе проектирования сложных технических устройств должно быть не только сокращение временных и вычислительных ресурсов, затрачиваемых на проектирование, но также возможность выбора параметров материала устройств для улучшения его технических характеристик, возможность оптимизации параметров, определяющих эффективность функционирования устройства. В данной статье для оптимизации параметров моделируемых устройств предлагается метод построения и конвертирования трехмерных компьютерных геометрических моделей, который, по предварительным оценкам, позволит повысить эффективность проектируемых устройств и сократить сроки разработки более чем на 20 %.

Метод построения и конвертирования трехмерных компьютерных геометрических моделей использован в задачах повышения эффективности управления рециркуляцией отработавших газов автомобиля. Большая часть вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, приходится на автомобильный транспорт (60 %) [Щурин, Третьяк, Герасимов, Вольнов, 2012]. Принцип работы системы рециркуляции основан на возвращении определенного количества отработавших газов обратно в цилиндры двигателя для окончательного сжигания в строго определенное время. Плата за снижение выхлопов посредством возвращения части отработавших газов: уменьшение мощности двигателя, уменьшение ресурса сажевого фильтра, требовательность к качеству топлива (по содержанию серы).

В настоящее время эксплуатируются сложные многоуровневые системы рециркуляции, управляемые от специального блока управления, они могут иметь различный набор устройств, но во всех системах присутствует клапан рециркуляции, влияющий на устойчивую работу двигателя автомобиля. Электромеханический клапан рециркуляции имеет несколько положений для регулирования, он наиболее перспективен для управления рециркуляцией по сравнению с вакуумным клапаном рециркуляции (имеет только два положения: открыт и закрыт) и по сравнению с электромагнитным клапаном (имеет несколько положений для регулирования, но надежность ниже, чем у электромеханического клапана).

Существующие методы расчета и моделирования электромеханического клапана рециркуляции в различных компьютерных средах трудоемки. Актуальна разработка методов и алгоритмов моделирования системы рециркуляции (электродвигателя и электропривода клапана рециркуляции) таким образом, чтобы минимизировать потери мощности двигателя и улучшить

качество топливной смеси для устойчивой работы двигателя в процессе проектирования, с использованием трехмерной среды моделирования для проведения оптимизационных расчетов.

## Постановка задачи

С помощью технологий 3D-моделирования построить расчетные зависимости для регулировки положения клапана рециркуляции таким образом, чтобы повысить качество топливной смеси и минимизировать потери мощности двигателя.

## Построение 3D-образов устройств системы управления рециркуляцией

Информационное обеспечение деятельности предприятий автосервиса должно развиваться с учетом новых технологий моделирования [Артюшенко, 2009; Грибут, Ларионова, Артюшенко, Виноградов, Поворина, 2009]. Типовая схема системы рециркуляции отработавших газов с электромеханическим клапаном на рисунке 1 выделена темным цветом. На рисунке 1 обозначены: 1 — устройство для аккумуляции паров топлива; 2 — клапан для соединения с атмосферой; 3 — перепускной клапан; 5 — форсунка; 10 — датчик массового расхода воздуха; 11 — дроссельная заслонка; 12 — электромеханический клапан рециркуляции; 14 — датчик частоты вращения коленчатого вала; 16 — датчики кислорода; 17 — ЭБУ (электронный блок управления) двигателя; 21 — топливный бак; 22 — топливный насос; 23 — педаль газа; 24 — АКБ (аккумуляторная батарея).

Азот N начинает вступать в реакцию с кислородом  $O_2$  в камере сгорания автомобиля при температуре выше  $1370^\circ C$ . Чем выше температура в камерах сгорания, тем больше образуется оксидов азота. Возврат части отработавших газов во впускной коллектор позволяет снизить температуру сгорания топливно-воздушной смеси и тем самым уменьшить образование оксидов азота. При этом соотношение компонентов в топливно-воздушной смеси остается неизменным, а мощностные характеристики двигателя изменяются незначительно.

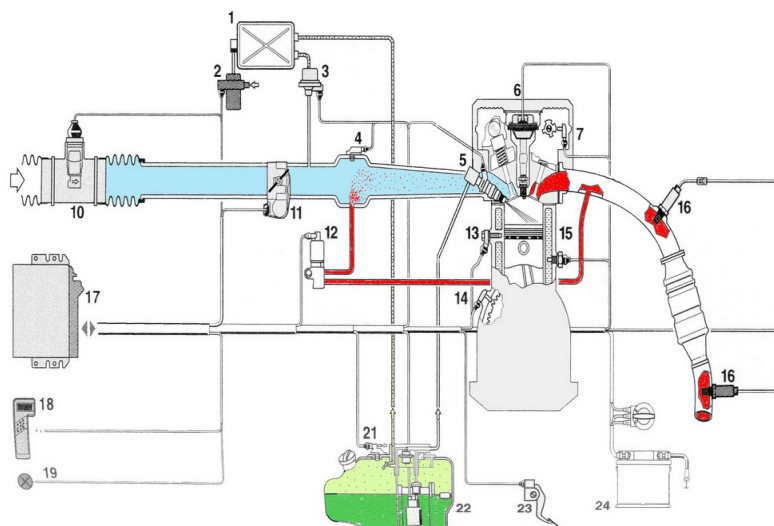


Рис. 1. Система управления двигателем с рециркуляцией отработавших газов

Система рециркуляции отработавших газов применяется как на бензиновых, так и на дизельных двигателях. На бензиновых двигателях внутреннего сгорания, оборудованных турбонаддувом, система рециркуляции отработавших газов не применяется. На разных конструкциях двигателей система рециркуляции отработавших газов имеет различное устройство.

Анализ структурных связей между элементами системы управления рециркуляцией для выбора параметров конструкции клапана рециркуляции и шагового электропривода, приводящего клапан в движение, позволяет сделать вывод о том, что при моделировании устройств системы в сборке можно использовать готовые компоненты (снизу вверх), проектировать новые компоненты в контексте конструкции (сверху вниз). Применение информационных технологий 3D-моделирования обеспечит легкую модификацию получаемых моделей.

Электромеханический клапан рециркуляции имеет несколько положений для регулирования, он наиболее перспективен для управления рециркуляцией по сравнению с вакуумным клапаном рециркуляции (имеет только два положения: открыт и закрыт) и по сравнению с электромагнитным клапаном (имеет несколько положений для регулирования, но надежность ниже, чем у электромеханического клапана).

Электропривод с постоянными магнитами осуществляет функции исполнительного механизма для открытия-закрытия клапана рециркуляции отработавших газов. Обмотка возбуждения электропривода является магнитопроводом и создает магнитное поле. При проектировании необходимо провести расчет параметров магнитного поля электропривода.

Для расчета параметров магнитного поля и переходных процессов после получения базовых моделей электромеханического клапана и электропривода в среде «Компас-3D» целесообразно выбрать программную среду Maxwell (компания Ansoft) [Аббасов, Аббасов, Аббасова, 2014]. Использование в среде Maxwell моделей, созданных в среде «Компас-3D», позволит ускорить процесс проектирования и упростить процесс моделирования. В среде «Компас-3D» задается только форма объекта, а в среде Maxwell (2D, 3D) задаются параметры материалов, направления магнитных линий, рассчитываются параметры устройств [Аббасов, 2014].

Алгоритм управления электромеханическим клапаном рециркуляции, приведенный на рисунке 2, одинаков для различных конструкций двигателя различных машин.

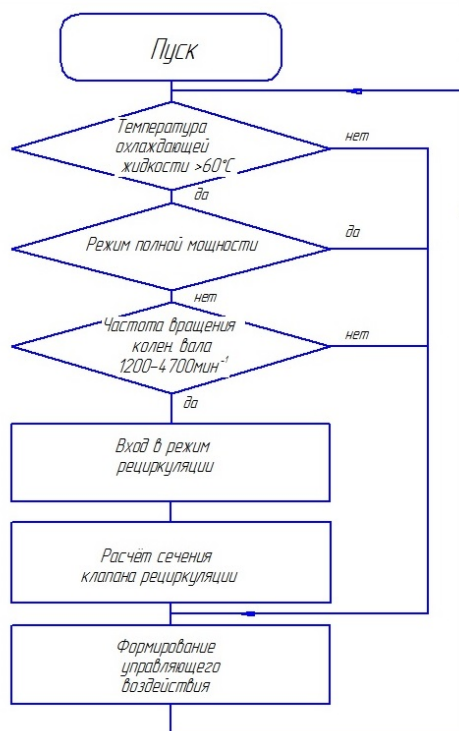


Рис. 2. Алгоритм управления рециркуляцией отработавших газов

Работа алгоритма зависит от оборотов двигателя, температуры охлаждающей жидкости, нагрузки на двигатель. Зависимость от оборотов двигателя заключается в том, что в пределах от 700–800 и до 1100–1200 включен холостой ход, температура сгорания газов незначительна,

следовательно, образования оксидов азота нет, и необходимости в рециркуляции нет. В пределах 4700 оборотов в минуту включается режим полного дросселя, т. е. дроссельная заслонка открыта на 100 %, следовательно, от двигателя требуется максимальная мощность. Для обеспечения максимальной мощности необходима богатая топливная смесь, а это противоречит системе рециркуляции, где при ее включении блок управления двигателем реализует программу «бедной смеси». Зависимость включения системы рециркуляции от температуры находится в определенном диапазоне, в котором двигатель считается прогретым, это от 45–60 °С и выше. Обоснованием включения системы является повышение температуры сгорания в цилиндрах двигателя, что приводит к образованию оксидов азота.

Зависимость от нагрузки на двигатель фактически определяется абсолютным значением массового расхода воздуха. Максимальное открытие клапана будет достигнуто при максимальных оборотах и максимальной нагрузке в режиме рециркуляции, т. е. 4600–4700 оборотов в минуту и 100 % открытой дроссельной заслонки (рис. 3).

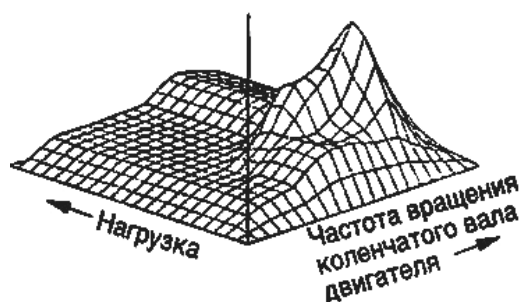


Рис. 3. Положение клапана EGR

Для построения 3D-образа клапана рециркуляции (рис. 4) выбран способ «снизу вверх», то есть сначала созданы (или выбраны из базы данных базовых моделей) по очереди все модели деталей, составляющих клапан рециркуляции, после этого произведена сборка.

Принцип открытия клапана рециркуляции основан на вращательно-поступательном движении. Электропривод, сборка которого с электромеханическим клапаном приведена на рисунке 5, с помощью вилки поворачивает водило, которое скользит по прорезям в обойме, и в результате клапан имеет поступательное движение.

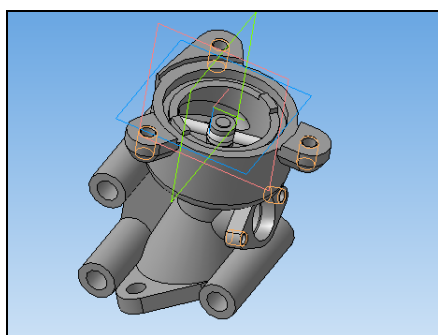


Рис. 4. 3D-образ клапана рециркуляции в сборке

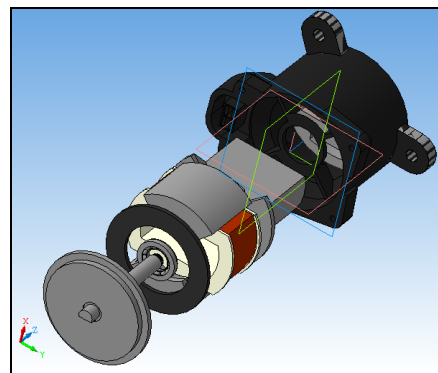


Рис. 5. 3D-образ сборки электропривода для электромеханического клапана EGR

Построение трехмерных компьютерных геометрических моделей устройств в сборке позволяет анализировать различные варианты компоновки элементов устройств, осуществить системный анализ элементов, устройств и системы, в которые входят эти устройства, в целом, на любом уровне сложности, а также выбрать параметры устройств и управляющие характеристики.

## Передача геометрии 3D-образов во внешний расчетный пакет

Конвертирование модели электропривода клапана рециркуляции из среды «Компас-3D» в среду Maxwell (3D, 2D) включает не только прорисовку геометрии данных компонентов системы управления рециркуляцией, но и создание полноценной модели с типом задачи — переходный процесс с вращательным движением [Аббасов, 2014; Артющенко, Аббасова, Белюченко, Васильев, Зиновьев, Стрелюк, Вокин, Самаров, Ставровский, Посеренин, Разумовский, Фоминский, 2014]. В среде «Компас-3D» задается только форма объекта, а в среде Maxwell-2D задаются параметры материалов, направления магнитных линий, рассчитываются параметры устройств системы управления рециркуляцией. Моделирование проведено для устройств системы управления рециркуляцией автомобиля Калина-2, но можно провести моделирование и для любого другого автомобиля, задав соответствующие этому автомобилю параметры.

Автором в программе Ansoft Maxwell смоделировано распространение магнитного поля электропривода клапана рециркуляции от обмотки. Моделирование включает следующие этапы.

1. Загрузка 3D-модели магнитной системы электропривода клапана рециркуляции, созданной в среде «Компас-3D», в среду Ansoft Maxwell.

2. Определение области, в которой будет отображаться сила магнитной индукции в вакууме. Так как в системе есть магнитопровод, то достаточно задать область примерно на 50 % больше относительно моделируемого устройства (в соответствии с правилами построения в среде Maxwell).

3. Выбор магнитов и их характеристик.

Выбираем неодимовый магнит (неодим–железо–бор) NdFeB35, так как он обладает следующими параметрами: остаточная магнитная индукция ( $B_r$ ) 1,17–1,22 Тл; коэрцитивная сила по намагниченности ( $H_{cm}$ ) 955 кА/м; рабочая температура 80 °С; максимальное энергетическое произведение ( $BH$ ) max 35 мГЭ.

4. Задание вектора направленности тока в катушке электропривода и проведение анализа собранной модели.

Задается вектор направленности тока в катушке (по часовой стрелке или против часовой стрелки). Схема распространения магнитной индукции в магнитной системе электропривода, полученная в среде Maxwell, приведена на рисунке 6. Схема служит для того, чтобы проанализировать, правильно ли собрана модель. Это необходимо для правильности дальнейших расчетов.

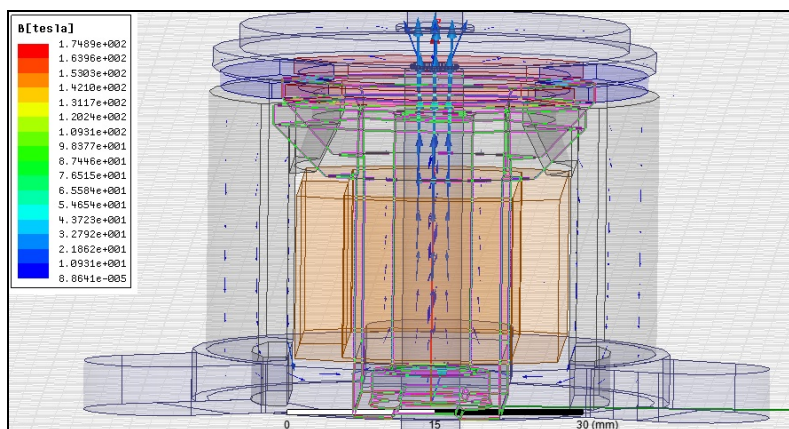


Рис. 6. Схема распространения магнитной индукции в системе

Из рисунка 6 видно, что модель собрана правильно, так как линии магнитной индукции проходят через магнитопровод. Интерфейс программы позволяет определить величину плотности магнитной индукции (выраженной в Тесла) с помощью цветовой маркировки.

5. Использование полученной модели электропривода для динамического расчета параметров магнитного момента от времени (рис. 7), угла поворота от времени (рис. 8) и силы тока от времени (рис. 9).



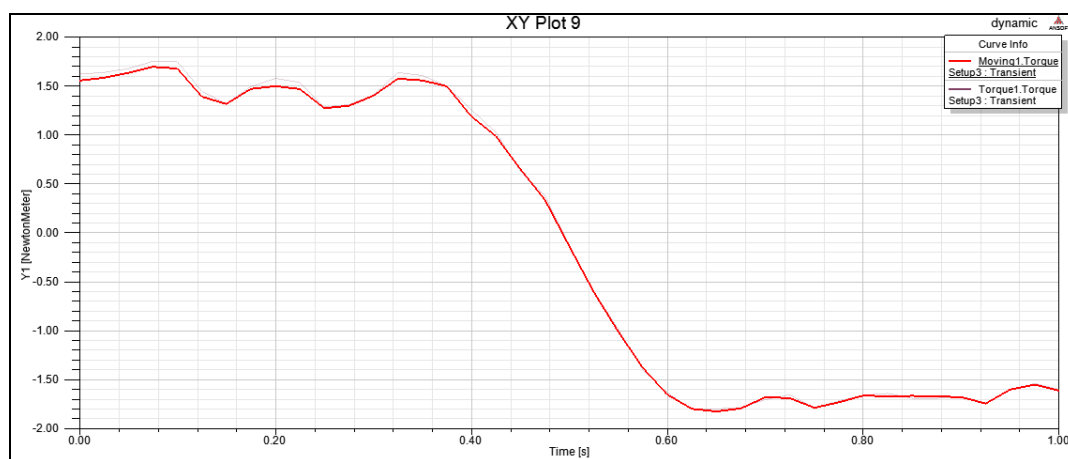


Рис. 7. Зависимость магнитного момента электропривода от времени

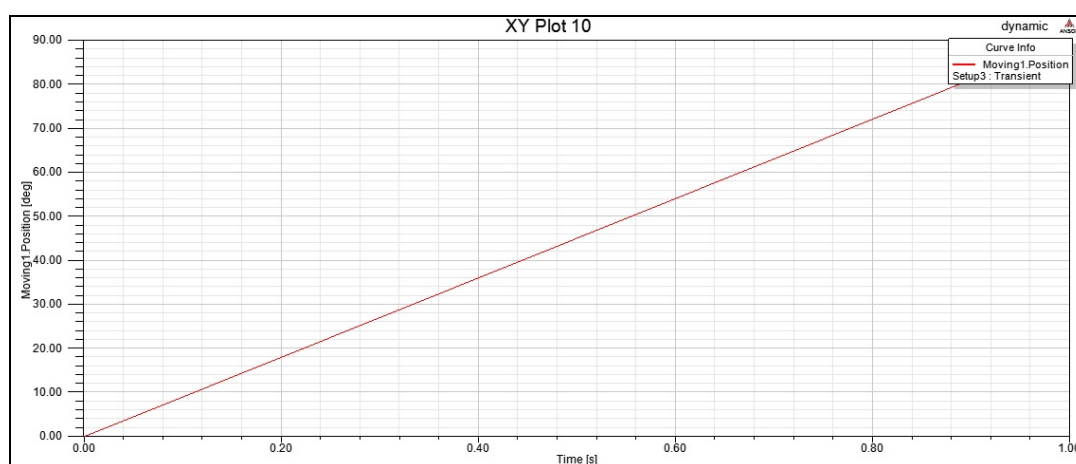


Рис. 8. Зависимость угла поворота ротора электропривода от времени

6. Построение зависимости тока управления от угла поворота ротора электродвигателя электропривода.

После построения зависимостей, приведенных на рисунках 7, 8, 9, строится зависимость тока управления от угла поворота ротора (рис. 10).

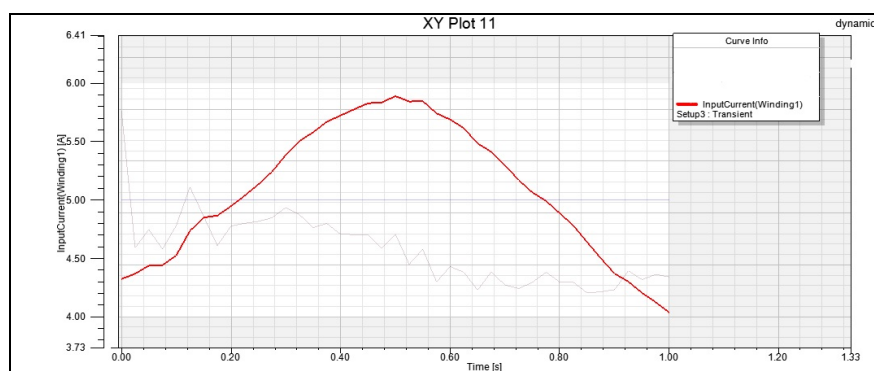


Рис. 9. Зависимость тока управления электропривода от времени

Результаты моделирования электропривода клапана рециркуляции в программе Maxwell использованы для получения расчетных зависимостей магнитного момента системы от времени, тока управления от времени и угла поворота от времени, на основании которых строится управляющая зависимость тока управления от угла поворота ротора электропривода. Получив

данную зависимость, можно выделить несколько точек, например 15°, 30°, 45°, 60°, 70°, и получить значение тока управления для открытия на заданный угол.

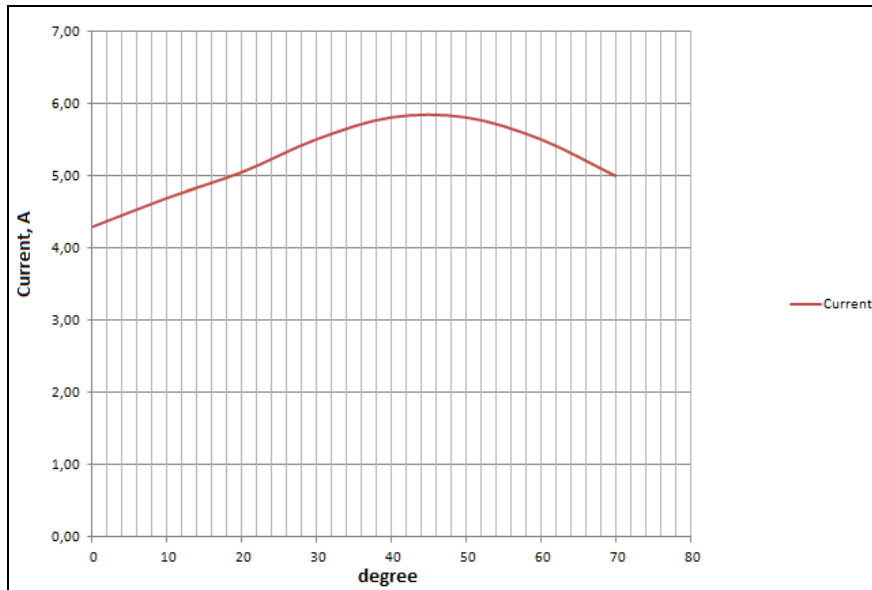


Рис. 10. Зависимость угла поворота ротора электропривода от тока управления

Полученная характеристика управления электроприводом записывается в элемент управления и используется для программирования элемента управления на открытие клапана рециркуляции в различные положения, в зависимости от условий, на какой угол поворота электропривода необходимо открытие. Размер сечения клапана рециркуляции зависит от угла поворота электропривода, а также от нагрузки на двигатель автомобиля и оборотов коленчатого вала двигателя.

Для оценки эффективности предложенного метода моделирования в трехмерной среде и последующего конвертирования для расчета оптимизируемых параметров предложены следующие показатели.

Коэффициент эффективности при построении 3D-моделей:

$$k_1 = T_6 / T_{кр},$$

где  $T_6$  — время на извлечение базовых моделей из предварительно созданной базы данных и изменение значений параметров базовых моделей в соответствии с данными геометрии устройств или заранее определенным способом;  $T_{кр}$  — время на конвертирование и расчет параметров устройства в специализированном приложении.

Под базовой моделью понимается построенная ранее трехмерная модель устройства, которая может быть использована для построения трехмерной модели проектируемого устройства. Например, для построения трехмерной модели электропривода можно использовать построенные ранее трехмерные модели похожего электропривода.

По мере построения и усложнения 3D-модели, в особенности, если речь идет о сборке нескольких элементов, образующих одно устройство (например, клапан рециркуляции в сборе с магнитопроводом и электроприводом), необходимо прогнозировать время, которое потребуется на собственно моделирование в трехмерной среде.

Исходя из условия, что общее время ( $T_6 + T_{кр}$ ) должно оставаться неизменным, при усложнении модели увеличивается время на моделирование, а время на конвертирование и расчет характеристик уменьшается. Следовательно, разрабатывать 3D-модель целесообразно до определенной степени сложности. Правильно определить момент перехода от построения 3D-модели к ее конвертации достаточно сложно — нужны сведения о зависимости факторов сложности 3D-модели, параметров получаемых устройств на время компьютерного конвертирова-



ния. Определение характера данной зависимости требует проведения большого объема работ [Аббасов А. Э., Аббасов Э. М., Аббасова Т. С., 2014]. Предлагается время, необходимое для конвертирования и последующего расчета оптимизационных характеристик, определять на основе имеющегося опыта, в соответствии со следующими вариантами:

- 1) процесс конвертирования и последующего расчета оптимизационных характеристик укладывается в отведенное время с его остатком;
- 2) процесс конвертирования и последующего расчета оптимизационных характеристик занимает ровно отведенное время;
- 3) процесс конвертирования и последующего расчета оптимизационных характеристик не укладывается в отведенное время.

На рисунке 11 изображена построенная на основе имеющегося опыта зависимость коэффициента эффективности использования 3D-программ  $k_2$  от отношения времени, необходимого для конвертирования и расчета  $T_{кр1}$  к времени, фактически отведенному на конвертирование и расчет  $T_{кр2}$

$$k_2 = T_{кр1}/T_{кр2}.$$

В точке А на рисунке 11 отражен начальный этап расчета оптимизационных характеристик в процессе проектирования. На конвертирование и оптимизацию простой 3D-модели требуется мало времени, но в результате могут быть получены управляющие характеристики, которые не смогут с хорошей точностью описать процесс управления моделируемыми устройствами. Низкий коэффициент эффективности использования программы ( $k_2 \in [0.1 \dots 0.3]$ ): большая часть времени не использована ни на оптимизацию, ни на построение 3D-модели.

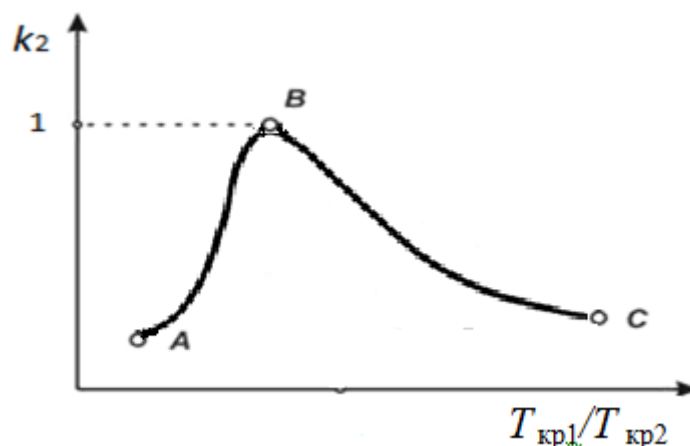


Рис. 11. Зависимость коэффициента эффективности использования 3D-программ  $k_2$  от отношения времени, необходимого для конвертирования и расчета

Участок А–В: неиспользуемое время постепенно сокращается, коэффициент эффективности использования программы увеличивается ( $k_2 \in ]0.3 \dots 1[$ ). Имеется возможность усложнения 3D-модели и увеличения объема вычислений оптимизационных характеристик за счет неиспользуемого времени. Средний коэффициент эффективности использования программы.

В точке В эффективность использования программы максимальна при равенстве необходимого времени на процесс конвертирования и последующего расчета и фактически выделенного времени. При необходимом качестве достигнут критерий оптимизации.

Участок В–С: снижение эффективности использования программы уже при нехватке времени на конвертирование и оптимизацию. Запланированные расчетные зависимости получены не в полном объеме из-за нехватки времени, хотя 3D-модель имеет хорошо проработанную детализацию. Средний коэффициент эффективности использования программы.

Точка С отражает ситуацию, когда времени на конвертирование и расчет недостаточно для получения оптимизационных характеристик. При этом эффективность использования программы не нулевая, так как при построении 3D-модели проработаны детали будущего устройства, но на излишне высоком уровне. Низкий коэффициент эффективности использования программы.

Оптимальный момент перехода от построения 3D-модели к началу процесса конвертирования наступает тогда, когда оставшегося времени ровно столько, сколько необходимо для оптимизации параметров моделируемого устройства. В этот момент 3D-модель имеет оптимальную для данного случая степень сложности, при которой эффективность использования программ 3D-моделирования максимальна и равна 1.

При проведении оптимизационных расчетов для отыскания максимума или минимума целевой функции, зависящей от переменных, описывающих состояние моделируемого устройства, предлагается ввести коэффициент эффективности расчетов в специализированном программном пакете как отношение полученного значения параметра оптимизации  $y$  в реальной системе к вычисленному параметру оптимизации  $y'$ :

$$k_3 = y/y'.$$

Общий показатель эффективности использования программ трехмерного моделирования с возможностью конвертирования и расчета оптимизационных параметров определяется как

$$K = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3.$$

Очевидно, что при  $K \rightarrow 1$  ( $k_1 \rightarrow 1$ ,  $k_2 \rightarrow 1$ ,  $k_3 \rightarrow 1$ ) общий показатель эффективности максимален.

Подсчитано сокращение временных затрат на проектирование устройств системы рециркуляции. Оценивалось десять вариантов расчетов для различных устройств с применением конвертирования трехмерных моделей и без применения. Общие затраты на проектирование сократились на 23 %.

## Выводы

Предложен алгоритм моделирования и расчета устройств клапана рециркуляции с использованием трехмерных компьютерных геометрических моделей. Алгоритм отличается от существующих алгоритмов и способов применения трехмерных компьютерных сред тем, что позволяет не только сократить сроки проектирования, осуществить визуализацию в презентационных целях, технологический процесс сборки устройств, но и рассчитать параметры, влияющие на эффективность функционирования моделируемых устройств. При использовании данного алгоритма на основе информационной 3D-модели, отражающей массогабаритные показатели устройства, формируется его математическая модель в специализированной программной среде, задаются параметры материалов, направления магнитных линий, проводится расчет параметров переходных электромагнитных процессов и управляющей зависимости тока управления от угла поворота электродвигателя электропривода клапана рециркуляции. С помощью полученной характеристики управления определяется угол поворота электродвигателя электропривода для открытия клапана рециркуляции в различные положения, которые выбираются из условия минимизации потерь мощности двигателя.

Для моделирования выбрана среда «Компас-3D», для расчета параметров вращающихся электрических машин — среда Maxwell. Моделирование можно провести не только для электропривода клапана рециркуляции автомобиля Калина-2, но и любого другого электропривода, задав соответствующие ему параметры.

Проведена оценка эффективности предложенного метода. Временные затраты на проектирование устройств системы рециркуляции сократились на 23 %.

## Список литературы

- Аббасов А. Э., Аббасов Э. М., Аббасова Т. С.* Проблемы моделирования переходных электромагнитных процессов оборудования системы рециркуляции автомобиля: сб. статей IV Международной заочной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2014)» / Поволжский гос. ун-т сервиса. — Тольятти: Изд-во ПБГУС, 2014. — С. 7–12 (272 с.). — ISBN 978-5-9581-0330-0.
- Аббасов А. Э.* Визуализация и анализ информации при построении 3D-моделей данных для микропроцессорной системы управления / А. Э. Аббасов, Т. С. Аббасова // Сб. тр. XIV Международной научно-практической конференции «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения»: Южно-Российский государственный политехнический университет. — Новочеркасск ЮРГПУ, 2014. — С. 3–4.
- Артюшенко В. М., Аббасова Т. С., Белюченко И. М., Васильев Н. А., Зиновьев В. Н., Стрелянюк Ю. В., Вокин Г. Г., Самаров К. Л., Ставровский М. Е., Посеренин С. П., Разумовский И. М., Фоминский В. Ю.* Современные исследования в области теоретических основ информатики, системного анализа, управления и обработки информации / В. М. Артюшенко: монография / под науч. ред. док. техн. наук, проф. В. М. Артюшенко. — Королев: ГБОУ ВПО ФТА, 2014. — 174 с.
- Артюшенко В. М.* Информационное обеспечение деятельности предприятий автосервиса / В. М. Артюшенко // Промышленный сервис. — 2009. — № 4 (33). — С. 3–10.
- Грибут И. Э., Ларионова А. А., Артюшенко В. М., Виноградов М. В., Поворина Е. В.* Автосервис: станции технического обслуживания автомобилей: учебное пособие. — М., 2008.
- Сазанов Е. А.* Повышение эффективности использования программ трехмерного моделирования в проектировании / Е. А. Сазанов // Молодой ученый. — 2014. — № 7. — С. 177–179.
- Шипунов А. Г., Юдаев А. В., Шуваев А. А., Кузнецов В. М., Привалова Т. В., Махонин В. В.* Способ автоматического построения трехмерной геометрической модели изделия в системе геометрического моделирования (патент РФ № 2325691). — 2008.
- Щурин К. В., Третьяк Л. Н., Герасимов Е. М., Вольнов А. С.* Гармонизация стандартов Европейского Союза и Российской Федерации по оценке влияния автотранспорта на экологические системы городов / К. В. Щурин, Л. Н. Третьяк, Е. М. Герасимов, А. С. Вольнов // Грузовик. — 2012. — № 9. — С. 36–44.