

Создание высокоточной модели электродвигателя для проектирования системы управления и верификации

Брэд Хип, Юрий Орлов, Департамент Mathworks, Softline

В статье описана последовательность операций при создании модели синхронной машины с постоянными магнитами с использованием программных пакетов MATLAB/Simulink и стандартного лабораторного оборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Точная программная модель технических средств является теоретическим фундаментом проектирования системы управления на основе модельно-ориентированного проектирования (МОП). С помощью грамотно построенной программной модели инженеры могут проверить работоспособность своей системы управления, проводить испытания с моделью, включённой в контур управления, настраивать коэффициенты посредством симуляции, оптимизировать проект и анализировать варианты, что было бы трудно или опасно реализовать на настоящем объекте.

Несмотря на все эти преимущества, инженеры неохотно тратят время и ресурсы на создание и проверку модели объекта. Их беспокоят вполне понятные вопросы: сколько времени займёт период симуляции, какие области знания и инструменты потребуются для построения и проверки модели,

и какое оборудование понадобится для сбора данных, необходимых для подтверждения правильности модели.

В этой статье описывается последовательность операций при создании модели синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ) с использованием программных пакетов MATLAB и Simulink и стандартного лабораторного оборудования. Процесс включает в себя три этапа:

- выполнение испытаний;
- идентификация параметров модели по результатам испытаний;
- проверка параметров посредством симуляции.

Автор использовал модель объекта для построения и настройки замкнутой модели системы управления СМПМ. Проводилось снятие переходной характеристики и выбега как при помощи симуляции на программной модели объекта и регулятора, так и при помощи тестирования на реальном СМПМ с использованием системы

тестирования в реальном времени xPC Target Turnkey, на которой был реализован регулятор.

Было установлено значительное совпадение результатов симуляции и аппаратного тестирования. При этом величина нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО) для основных сигналов, таких как скорость ротора и фазные токи двигателя, составила менее 2% (см. рис. 1).

МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА И ЕЁ ПАРАМЕТРЫ

Модель СМПМ, разработанная в программных пакетах расширения MATLAB: SimPowerSystems и Simscape, в данном примере включает в себя электродвигатель и нагрузку – акриловый диск. Модель имеет 9 параметров, которые определяют её поведение: один связан с нагрузкой (инерция диска), и восемь – с электродвигателем (см. рис. 2).

Модель состоит из подсистемы с алгоритмами управления (Embedded Processor – встроенный процессор), подсистемы с моделью объекта (PMSM inverter and disc – инвертор и диск), блоков формирователей входных воздействий и блоков визуализации результатов моделирования. В подсистеме с моделью объекта содержатся блоки, моделирующие инвертор, СМПМ и акриловый диск. Для моделирования инвертора и СМПМ использованы базовые блоки из библиотеки SimPowerSystems. Для моделирования акрилового диска использованы базовые блоки из библиотеки механических компонентов Simscape. Блок, который моделирует инвертор и СМПМ, подключён к блоку, моделирующему акриловый диск через линии связи, которые имеют физический смысл идеальных, не имеющих массы, вращающихся валов. Модель СМПМ построена с учётом следующих допущений:

- модель воздушного зазора является однородной, то есть пренебрегает моментом от зубцовых гармонических помех магнитному полю;

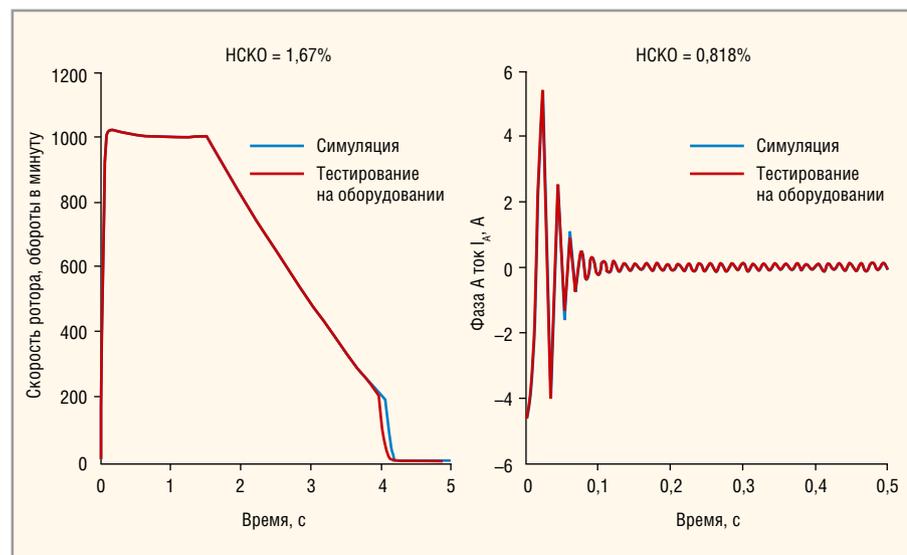


Рис. 1. Сравнение результатов симуляции (синяя кривая) и аппаратного тестирования (красная кривая) для скорости ротора (слева) и фазного тока (справа)

- индуктивность не зависит от положения ротора (пренебрежение реактивным моментом);
- модель электропроводности не учитывает потери в сердечниках и в магнитных материалах машины, а также частотной зависимости сопротивления статора;
- магнитное насыщение отсутствует;
- модель трения является линейной. Температурные эффекты не учитывались.

Перечисленные допущения упрощают модель СМППМ, но не влияют на фундаментальную логику работы машины.

Для определения этих параметров было выполнено пять тестов (см. таблицу). (Основное внимание в данной статье уделено тесту выбега и реакции на скачок постоянного напряжения.) Они демонстрируют поступательно усложнённые методы идентификации параметров и иллюстрируют извлечение значений параметров посредством аппроксимации кривой и оценки параметров, соответственно.

Для каждого теста описан испытательный стенд, затем идёт пояснение того, как выполнен тест и собраны данные, а также извлечено и проверено значение параметра.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНЕРЦИИ РОТОРА ПРИ ПОМОЩИ ТЕСТА ВЫБЕГА

Для определения инерции ротора (H) его раскручивали до начальной скорости (ω_{r0}) и измеряли скорость вращения (ω) вплоть до остановки по инерции. При помощи этого измерения определялась инерция ротора путём аппроксимации кривой, соответствующей уравнению для ω_r , к измеренной скорости вращения, происшедшего в течение периода времени вращения электродвигателя до полной остановки.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{H}(T_{em} - b\omega_r - J_0 - T_{load}). \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение (1) описывает механическое поведение электродвигателя. Тест выбега настраивался так, чтобы момент нагрузки (T_{load}) всегда был равен 0. Как только двигатель разогнался до начальной установившейся скорости, его выключали, чтобы электромагнитный момент (T_{em}) также был равен 0. При этих условиях решение для (1) получается из уравнения для ω_r :

$$\omega_r = \left(\omega_{r0} + \frac{J_0}{b}\right)e^{-\frac{b}{H}t} - \frac{J_0}{b}, \quad (2)$$

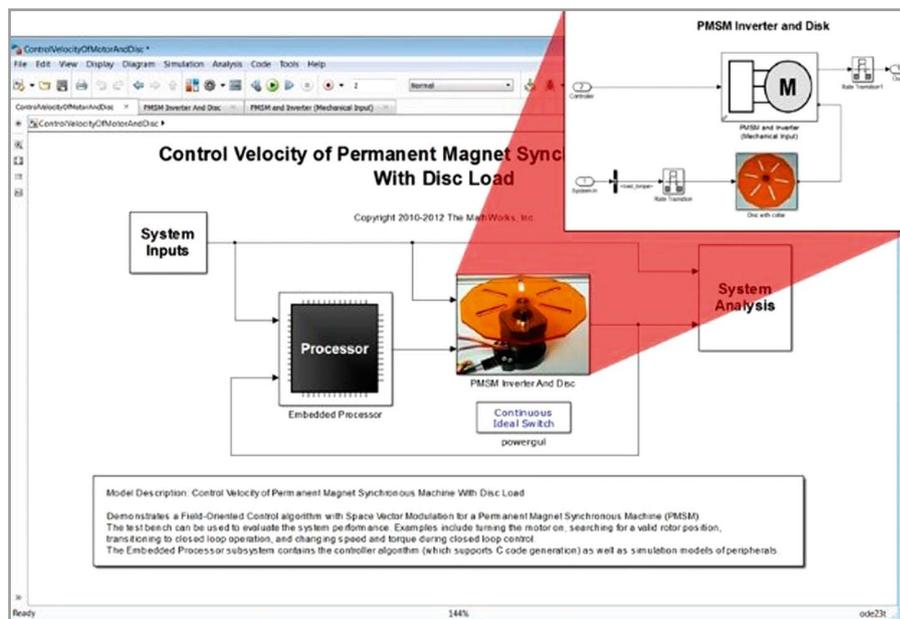


Рис. 2. Модель СМППМ в Simulink

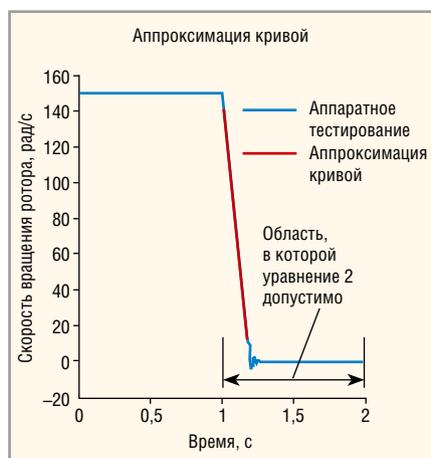


Рис. 3. График скорости вращения ротора во время теста выбега. Синяя кривая – результат аппаратных испытаний; красная кривая – результат аппроксимации кривой

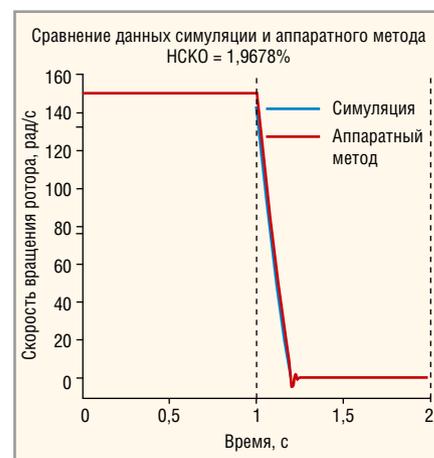


Рис. 4. Сравнение измеренной скорости ротора (красная кривая) и скорости ротора, полученной при помощи симуляции (синяя кривая)

Параметры модели и тесты, выполненные для их определения

Название теста	Идентифицируемые параметры	Метод идентификации
Бифилярный маятник	Инерция диска (Hd)	Расчёт
Противо-ЭДС	Число полюсов (P) Постоянная потокосцепления (Arm) Моментный коэффициент (Kt)	Расчёт
Трение	Коэффициент вязкого демпфирования (b) Сухое трение (J ₀)	Аппроксимация кривой
Выбег	Инерция ротора (H)	Аппроксимация кривой
Скачок постоянного напряжения	Сопrotивление (R) Индуктивность (L)	Оценка параметров

где ω_r – скорость вращения вала ротора, ω_{r0} – начальная скорость вращения вала ротора, J_0 и b – сухое трение и коэффициент вязкого демпфирования, соответственно, определённые при помощи отдельного теста на трение, T_{em} – электромагнитный момент (во время этого теста был равен 0), T_{load} – момент нагрузки (во время этого теста был равен 0).

ВЫПОЛНЕНИЕ ТЕСТА И СБОР ДАННЫХ

В лаборатории был создан испытательный стенд для разгона мотора до скорости 150 рад/с при управлении скоростью в разомкнутом контуре. Стенд состоял из мотора СМППМ, датчика углового положения ротора, инвертора и системы реального вре-

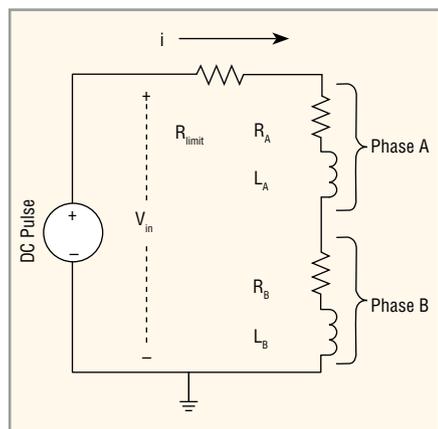


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема для теста на скачок постоянного напряжения

мени xPC Target Turnkey. При достижении данной скорости привод выключали и ротор останавливался по инерции. В ходе испытаний считывался выходной сигнал датчика углового положения ротора. Алгоритмы управления угловой скоростью вращения СМПМ были реализованы в модели Simulink и при помощи программных пакетов расширения MATLAB: Simulink Coder и xPC Target, модель была реализована в системе реального времени xPC Target. Данные об угловом положении ротора были считаны при помощи системы реального времени xPC Target и импортированы вместе с данными о времени в MATLAB. В MATLAB по данным об угловом положении ротора и времени были получены данные о скорости ротора.

Извлечение и проверка значений параметров

После выполнения тестов данные измерений скорости были визуализированы в MATLAB и использованы в программном пакете расширения MATLAB Curve Fitting Toolbox. Это позволило аппроксимировать уравнение (2) для угловой скорости вращения ротора (ω_r) к данным измерения скорости ротора в процессе выбега. С использованием значения N , полученного из аппроксимации кривой, была проведена оценка уравнения (2) от начала выбега, а результаты были выведены на график вместе с исходными данными испытаний (см. рис. 3). Как показывает рисунок 3, уравнение (2) со значением N , полученным из аппроксимации кривой, весьма точно предсказывает скорость вращения двигателя во время выбега.

Для проверки результатов идентификации параметров была использована

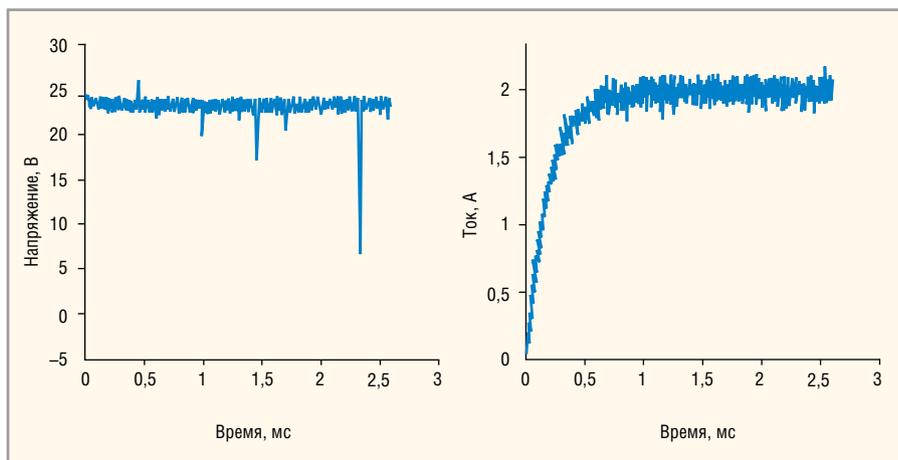


Рис. 6. Напряжение (слева) и ток (справа) при подаче импульса в тесте на скачок постоянного напряжения

следующая модель. С помощью значения инерции ротора, полученного из теста выбега ($3.2177 \times 10^{-6} \text{ кг} \times \text{м}^2$ для данной модели СМПМ), была выполнена симуляция выбега в Simulink. Затем результаты симуляции сравнили и визуализировали с результатами измерений (см. рис. 4). При величине НСКО, приблизительно равной 2%, результаты совпадают практически полностью.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНДУКТИВНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ТЕСТА НА СКАЧОК ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ

В этом тесте измерялся результирующий ток, для чего к выводам фаз двигателя А и В прикладывалось постоянное напряжение. В данных условиях трёхфазный СМПМ электрически эквивалентен схеме с двумя резисторами и двумя индуктивностями, включёнными последовательно (см. рис. 5).

Измеренный ток (i) использовался для определения значений параметров сопротивления и индуктивности. Во время теста ротор удерживался в неподвижном состоянии во избежание усложнения анализа из-за выбросов противо-ЭДС, которые, как правило, противодействуют току. Чтобы не сжечь двигатель при удержании ротора в неподвижном состоянии, в схему был добавлен токоограничительный резистор (R_{limit}), а вместо скачка постоянного напряжения использовался импульс.

Выполнение теста и сбор данных

Для проведения теста снова использовались программный пакет расширения MATLAB xPC Target и система реального времени xPC Target Turnkey.

В Simulink была разработана модель, которая генерировала серию 24-вольтных импульсов длительностью примерно 2,5 мс каждый. Эта модель была реализована в системе xPC Target при помощи Simulink Coder, а импульс напряжения был приложен к выводам фаз А и В электродвигателя. При помощи осциллоскопа производились измерения приложенного напряжения и тока, протекающего через двигатель. С использованием программного пакета расширения MATLAB Instrument Control Toolbox данные измерений считывались в MATLAB, где визуализировались результаты (см. рис. 6).

Извлечение и проверка значений параметров

Извлечение значения сопротивления фазы из результатов измерений потребовало применения к измеренным установившимся значениям напряжения и тока только закона Ома ($R = V/I$). Для СМПМ получилось сопротивление $23,26 \text{ В} / 2,01 \text{ А} = 11,60 \text{ Ом}$. Из полученного значения вычли 10 Ом (сопротивление токоограничительного резистора) и поделили результат на 2, поскольку при тестировании в контуре находилось два фазных сопротивления, соединённых последовательно. В результате получилось значение сопротивления фазы, равное 0,8 Ом.

Определение индуктивности потребовало более сложного подхода. На первый взгляд, это выглядит так, словно была использована аппроксимация кривой, как при определении инерции ротора. Однако из-за внутреннего сопротивления источника постоянного тока, измеренное напряжение постоянного тока снижалось от начального

значения 24 В при запуске теста, когда ток в схеме был равен 0, до установившегося значения в 23,26 В после того, как ток стал протекать в схеме. Поскольку входное напряжение не является чистым ступенчатым скачкообразным сигналом, то результаты аппроксимации кривой, соответствующей решению уравнения для последовательной RL-цепи, были бы не точными.

Чтобы преодолеть эту трудность, был выбран более надёжный подход, использующий оценивание параметра и программный пакет расширения MATLAB Simulink Design Optimization. Преимущество этого подхода состоит в том, что он не требует ни чистого ступенчатого скачка входного сигнала, ни аппроксимации кривой.

При помощи Simulink и Simscape была смоделирована эквивалентная двигателю последовательная RL-цепь (см. рис. 7). В качестве токоограничительного резистора (R_{limit}) и фазного сопротивления (R_{hat}) в модели использовались значения, определённые в предыдущих тестах. В программе Simulink Design Optimization измеренное напряжение использовалось в качестве входного для модели, а значение индуктивности (L_{hat}) оценивалось таким образом, чтобы ток, предсказанный моделью, максимально близко соответствовал измеренному.

Чтобы проверить значения, полученные для сопротивления фазы (0,8 Ом) и индуктивности (1,15 мГн), они были введены в модель СМПМ, на вход которой подавались те же воздействия, которые использовались при симуляции реального двигателя. Сравнение результатов симуляции с измеренными результатами показало их близкое совпадение: с НСКО ~3% (см. рис. 8).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РЕГУЛЯТОРА

После идентификации и верификации всех основных параметров модель СМПМ была готова к использованию для разработки регулятора электродвигателя. Для настройки коэффициентов пропорционального и интегрального звеньев внешнего контура регулятора использовалась программа Simulink Design Optimization. Чтобы проверить работоспособность модели регулятора, запускалась симуляция системы с обратной связью. Для генерации кода из модели, которая была реализована на целевой машине реального

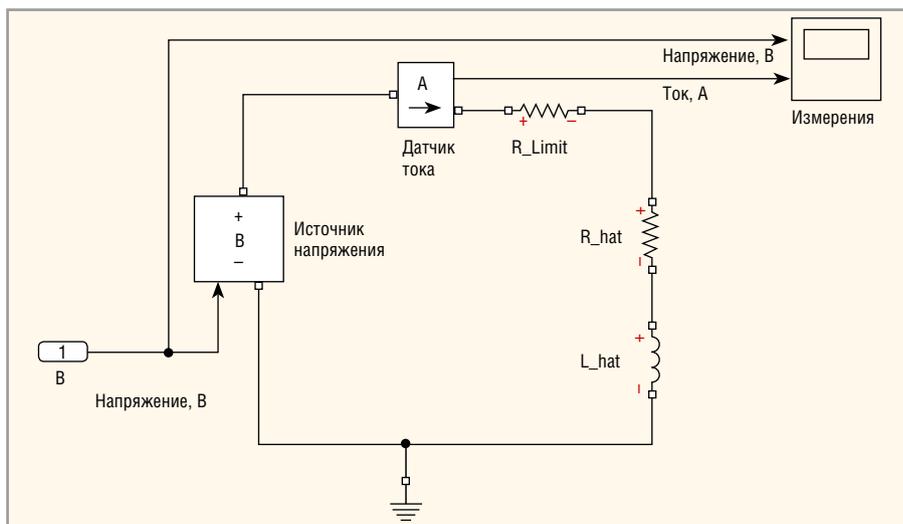


Рис. 7. Модель цепи, эквивалентной двигателю, в программе Simscape

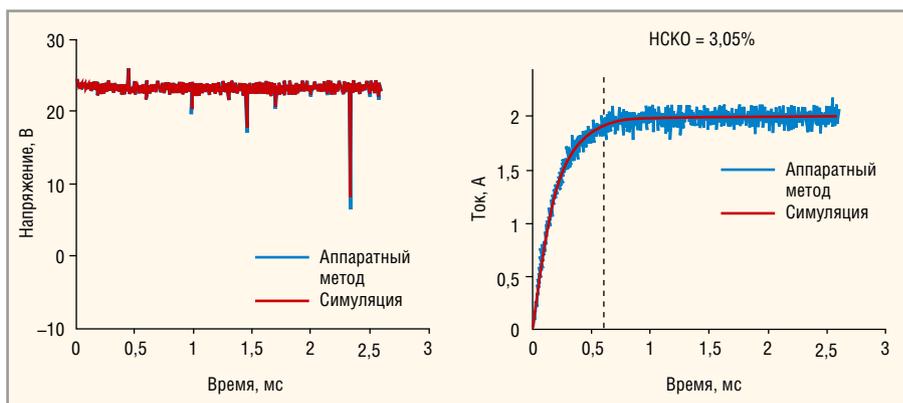


Рис. 8. Сравнение результатов измерений (синяя кривая) с результатами симуляции (красная кривая) для напряжения (слева) и тока (справа)

времени xPC Target Turnkey, использовалась программа Simulink Coder.

В качестве заключительного этапа верификации регулятора запускались симуляции скачка и выбега в Simulink, а также тесты аппаратуры с использованием кода реализованного регулятора на системе реального времени xPC Target Turnkey. Сравнение результатов симуляции и испытаний аппаратных средств для скорости ротора и фазного тока вновь показало близкое совпадение данных модели и реальной аппаратуры. НСКО составило <2% в обоих случаях (см. рис. 1).

Выводы

При разработке модели СМПМ особое внимание было уделено двум тестам идентификации параметров. Были собраны данные посредством датчика углового положения ротора для теста выбега и с помощью осциллоскопа для теста на скачок постоянного напряжения. Информация извлекалась посредством аппроксимации кривой для теста выбега и с помощью оценки параметров для теста на скачок постоянного

напряжения. Значения всех параметров верифицировались путём сравнения результатов симуляции и измерений при испытаниях, что позволило получить модель объекта, которой можно доверять при разработке и настройке регулятора.

Вся эта работа может быть сделана на ранних этапах процесса разработки, задолго до того, как для системы управления будет сгенерирован встраиваемый код. Это позволит инженерам искать и устранять проблемы в технических требованиях и в проекте до начала аппаратного тестирования. Получаемые преимущества, как правило, оправдывают все затраты, связанные с созданием модели объекта. Особенно, если эта модель неоднократно используется в других проектах.

Автор хотел бы выразить признательность профессору Хиту Хофману (Heath Hofmann) из Университета Мичигана, который порекомендовал процедуры испытаний для СМПМ и разрешил использовать своё лабораторное оборудование в начальной фазе этого проекта.

