Др. Брюс С. Ригби
Доцент
Школа электрической, электронной и вычислительной техники
Университет КваЗулу-Натал (ЮАР)

Лабораторная работа
«Трехфазный асинхронный двигатель»

Пояснения

Данная методика максимально близко отражает суть опытов и измерений, выполняемых студентами на типичных практических лабораторных занятиях в рамках курса электрических машин в первом семестре третьего года обучения.

Для выполнения этой лабораторной работы необходимо наличие программно-аппаратного комплекса RTDS в составе минимальной комплектации аппаратной части комплекса RTDS и установленной на персональный компьютер программой RSCAD.

Для проведения опытов, в программе RSCAD был построен виртуальный макет цепи с использованием стандартной модели асинхронного двигателя из библиотеки элементов программы. Для введения в опыт потерь в магнитопроводе виртуального двигателя, параллельно к нему был добавлен набор сопротивлений, соединенных «звездой». Потери в магнитопроводе не отражены в модели электродвигателя из библиотеки RSCAD, поскольку это не существенно для исследований мощных асинхронных машин. Тем не менее, измерение этого элемента в эквивалентной схеме замещения является стандартной составляющей такого типа лабораторных занятий по изучению асинхронных двигателей небольшой мощности. Характеристика намагничивания асинхронной машины принята линейной, насыщенностью намеренно пренебрегли. Была введена небольшая величина потерь при вращении, поэтому двигатель работает с небольшим скольжением при отсутствии приложенного крутящего момента, что отражает работу реального двигателя, в котором присутствуют трение и сопротивление воздуху. Момент нагрузки, прикладываемый к двигателю во время опытов (с помощью модуля RUNTIME программы RSCAD), измеряется в Ньютон-метрах, что преобразуется в аналогичную единицу измерения крутящего момента, используемую в моделях RSCAD, с помощью модуля DRAFT.

Методика проведения лабораторной работы

Введение

Цель лабораторной работы – измерение действующих значений параметров эквивалентной схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя с помощь опытов без нагрузки и с застопоренным ротором, измерение нагрузочных характеристик виртуального двигателя и сравнение их с характеристиками эквивалентной схемы.

После того, как описанные опыты будут проведены, вы будете сравнивать нагрузочные характеристики виртуального двигателя при различных значениях электрического сопротивления ротора. В завершение вы будете наблюдать поведение двигателя в течение запуска в режиме приложенной нагрузки. То же самое нужно будет проделать для разных значений сопротивления ротора.

Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя в данной лабораторной работе предполагает представление трехфазной машины на основе одной фазы. Вычисление параметров этой модели можно производить, взяв за основу две схемы соединения фаз: соединение «звезда» или соединение «треугольник». В нашем случае принято соединение «звезда».

Интерфейс RUNTIME

Перед тем как приступить к проведению опытов, необходимо сначала изучить схему виртуального лабораторного макета, построенного в модуле RUNTIME программы RSCAD. Схема показана на рисунке 1.

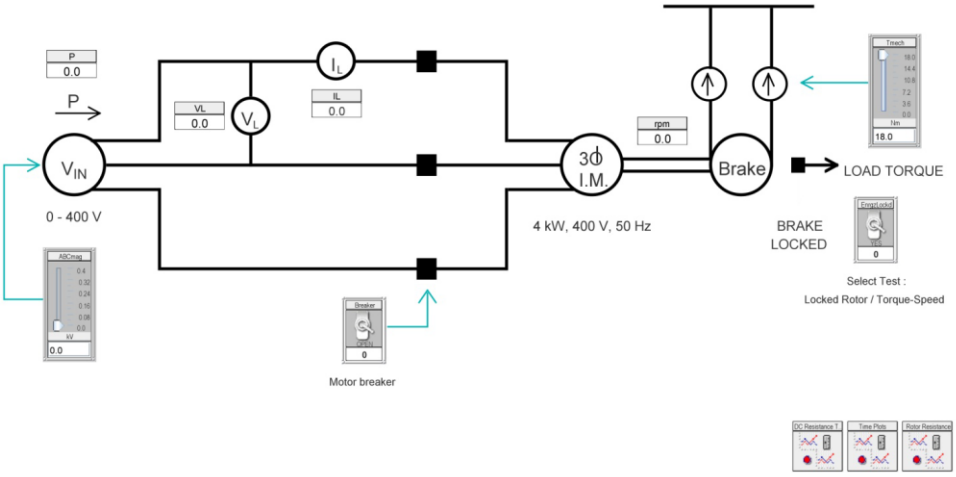

Рисунок 1 Схема для лабораторной работы с трехфазным асинхронным двигателем

Виртуальный двигатель на схеме макета представляет собой модель асинхронной машины со следующими номинальными параметрами: напряжение 400В, мощность 4 кВт, частота 50 Гц.

Номинальный ток статора 8,16 А. Обмотки питаются переменным напряжением 0-400 В от трехфазного источника, обозначенного на схеме V_{IN}. Ползунок под источником V_{IN} используется для настройки напряжения, подаваемого на первичную обмотку двигателя. В схеме предусмотрена индикация межфазного напряжения V_L, тока на линии I_L , полной активной потребляемой мощности P. Единицы измерения этих величин: В, А, Вт соответственно.

К валу виртуального двигателя приложена нагрузка с возможностью изменения с помощью ползунка с правой стороны схемы. Также имеется элемент отображения скорости двигателя, расположенный над изображением вала. Перед подачей питания на двигатель, его вал может быть застопорен, либо к нему может быть приложена изменяемая нагрузка. Это делается переключателем под ползунком. Стрелка на экране RUNTIME будет изменять позицию, показывая в каком режиме (Brake locked/«Выключатель замкнут» или Load torque/«Момент нагрузки») испытывается двигатель при запущенном моделировании.

Разъединители на фазах, подающие питающее напряжение к статору двигателя, открываются и закрываются с помощью переключателя. После запуска процесса моделирования символ разъединителя в окне RUNTIME будет изменять свой цвет в зависимости от того, в каком состоянии, разъединенном или замкнутом, находится выключатель. Эта особенность позволит вам визуально следить за его состоянием.

Также есть три подгруппы компонентов внизу экрана, названных “DC Resistance Test”/«Проверка сопротивления при постоянном токе», “Time Plots”/«Осциллограммы» и “Rotor Resistance”/«Сопротивление Ротора». Подгруппа “DC Resistance Test” будет использоваться для измерения определенных параметров (например, сопротивление статора) в схеме замещения, что требует изменения цепи, показанной на рисунке 1. Подгруппа “Time Plots” понадобится позже для сравнения переходных характеристик двигателя в режиме запуска под нагрузкой. Подгруппа “Rotor Resistance” позволит сравнивать нагрузочные характеристики при различных значениях сопротивления ротора, которое может быть изменено перед стартом процесса моделирования. После запуска моделирования ползунок настройки сопротивления ротора станет серым, что будет означать невозможность изменения его положения, пока моделирование запущено. Обе последние группы должны быть установлены в минимум перед началом лабораторной работы.

Опыт с застопоренным ротором.

Цель этого опыта – определить значения последовательно соединенных элементов сопротивления: $r = r_1 + r_2'$ и $x = x_1 + x_2'$ в схеме замещения асинхронного двигателя.

Если моделирование еще не запущено, запустите его нажатием кнопки «Run Case» в программном модуле RUNTIME, установите разъединитель цепи двигателя так, чтобы переключатели были в позиции «разомкнуто». Используя соответствующий ползунок, установите входное напряжение V_{IN} в ноль и, используя переключатель “Select test”/«Выбор вида испытания», установите виртуальный двигатель в состояние “Brake locked”/«Выключатель замкнут». Теперь замкните переключатели цепи двигателя и увеличьте входное напряжение статора до уровня, соответствующему току 8,16 А (обратите внимание, что

для достижения номинального тока, в то время как ротор удерживается на месте, требуется очень низкое входное напряжение).

Запишите показания индикаторов напряжения, тока и мощности в цепи статора двигателя.

Таблица 1. Значения электрических величин в опыте с застопоренным ротором

Переменные	Значения
Vs	V_L = 80.09 В
Ps	P = 668,8 Вт
Is	I_L = 8,16 А

В условиях опыта с застопоренным ротором напряжение, прикладываемое к обмоткам статора, принимается достаточно низким, для пренебрежения токами I_L и I_M, поэтому эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя может быть упрощена:

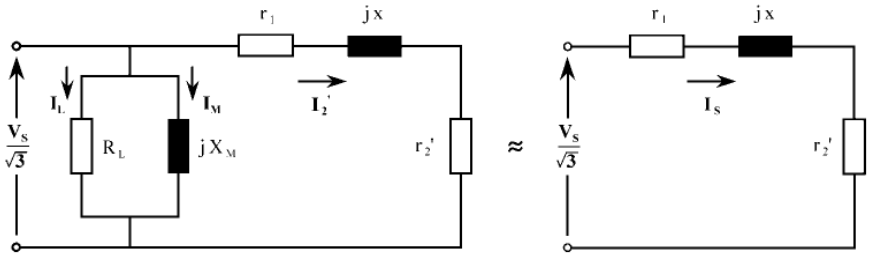

Рисунок 2 Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя в опыте с застопоренным ротором

Учитывая сделанное упрощение, получаем:

Активная мощность на одну фазу:

$$P_{S\,1\Phi} = \frac{P_S}{3} = \frac{668.8}{3} = 222.93\ W$$

$$r = \frac{P_{S\,1\Phi}}{I_S{}^2} = \frac{222.93}{8.16^2} = 3.348\ \Omega$$

$$Z = \frac{V_S\ /\sqrt{3}}{I_S} = \frac{80.09/\sqrt{3}}{8.16} = 5.667\ \Omega$$

$$x = x_1 + x_2{}' = \sqrt{Z^2 - r^2} = \sqrt{5.667^2 - 3.348^2} = 4.572\ \Omega$$

Опыт с активным сопротивлением.

Цель этого опыта – определить значение сопротивления статора r_1 в схеме замещения асинхронного двигателя в целях обеспечения разделения значения полного сопротивления r, измеренного в предыдущем опыте, на составляющие r_1 и r_2'.

Для выполнения этого опыта вам нужно раскрыть на схеме виртуального макета подгруппу “DC Resistance Test”/«Проверка сопротивления при постоянном токе», кликнув по ней левой кнопкой мыши при наведении курсора без остановки процесса моделирования (не нужно делать какие-либо изменения в главном окне RUNTIME, оно должно оставаться неизменным в течение этого опыта). Эквивалентная схема подгруппы “DC Resistance Test” состоит из соединённых в цепь источника постоянного напряжения и фаз A и C двигателя, фаза B остается отключенной. Имеется возможность изменения величины напряжения источника.

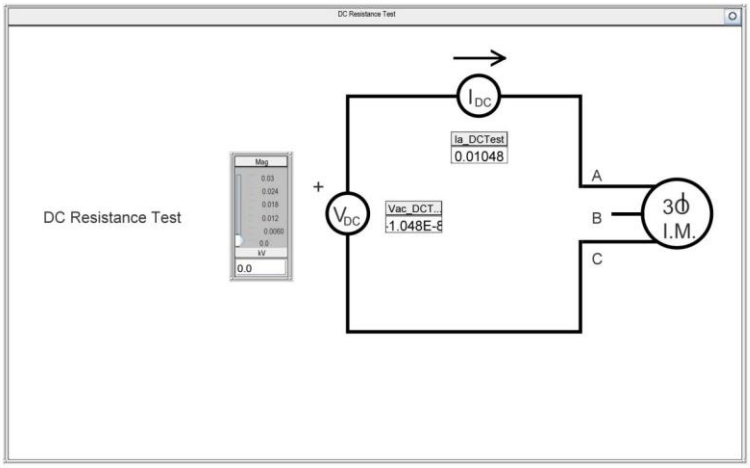

Рисунок 3. Эквивалентная схема подгруппы “DC Resistance Test” в программе RUNTIME

При запущенном моделировании изменяйте величину напряжения с помощью ползунка, производя записи трех значений напряжения и тока (5, 10 и 15 В). Занесите в таблицу измеренные значения и вычислите по ним значения сопротивления обмотки одной из фаз статора двигателя. Использование трех различных значений позволяет определить сопротивление обмотки статора по наклону кривой графика U(I), но при желании вычисление можно сделать, используя одиночные значения напряжения и тока.

Таблица 2. Измерения опыта с активным сопротивлением

V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	$R_{IN} = V_{DC}/I_{DC}$ (Ohm)
5,0	1,725	2,899
10,0	3,450	2,899
15,0	5,175	2,899

Когда вы завершите измерения, сверните окно подгруппы “DC Resistance Test” (нажмите левой кнопкой на кружочке в верхнем правом углу окна) и вернитесь в главное окно RUNTIME без прекращения процесса моделирования.

Для соединения обмоток статора по типу «звезда» имеем:

$$R_{IN} = 2r_1 \Rightarrow r_1 = \frac{R_{IN}}{2} = 1.450\ \Omega$$

$$r_2' = r - r_1 = 3.348 - 1.450 = 1.898\ \Omega$$

Опыт без нагрузки

Цель этого опыта – определить величины элементов сопротивления в схеме замещения асинхронного двигателя.

Если моделирование еще не запущено, запустите его нажатием кнопки «Run Case» в программном модуле RUNTIME и установите разъединитель цепи двигателя так, чтобы переключатели были в позиции «разомкнуто».

Уменьшите входное напряжение V_{IN} до нуля, затем разомкните выключатель цепи двигателя и, используя переключатель “Select Test”, переведите двигатель в состояние нагрузки.

Теперь увеличьте входное напряжение V_{IN} до номинального значения напряжения статора (400 В) и проверьте, чтобы момент нагрузки, приложенный к двигателю, был равен 0 (бегунок Tmech). Замкните разъединитель цепи двигателя для его пуска при полном напряжении и нулевой нагрузке (такой способ известен как прямой пуск).

Когда двигатель перейдет в режим стабильной работы (то есть все отображаемые электрические величины прекратят изменяться), запишите показания измерительных приборов V_L , P и I_L в цепи статора.

Таблица 3. Измерения опыта без нагрузки

Переменные	Значения
V_0	V_L = 400,0 В
P_0	P = 2220 Вт
I_0	I_L = 4,82 А

В этом опыте пренебрегаем скольжением двигателя, поэтому схема замещения принимает следующий вид:

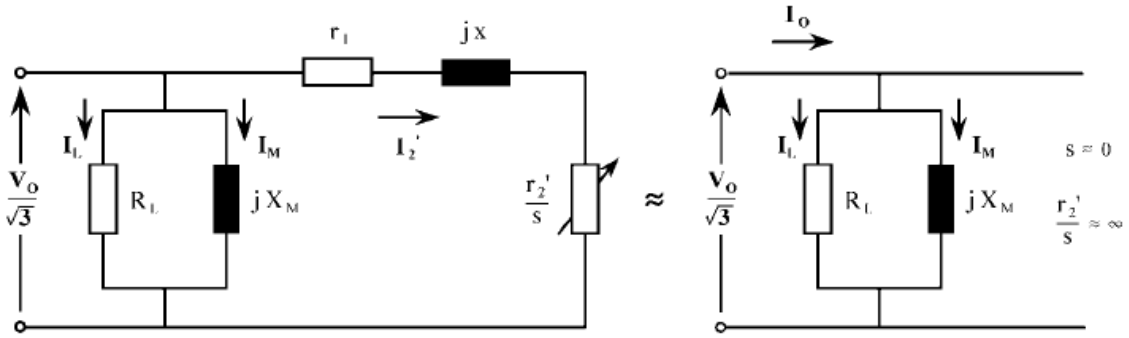

Рисунок 4 Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя в опыте без нагрузки

Тогда из преобразованной схемы, используя измеренные значения, получаем:

$$P_{0\,1\Phi} = \frac{P_0}{3} = \frac{2220}{3} = 740\,W$$

$$R_L = \frac{(V_0/\sqrt{3})^2}{P_{0\,1\Phi}} = \frac{(400/\sqrt{3})^2}{740} = 72.072\,\Omega$$

$$I_L = \frac{V_0/\sqrt{3}}{R_L} = \frac{400/\sqrt{3}}{72.072} = 3.204\,A$$

$$I_M = \sqrt{I_0{}^2 - I_L{}^2} = \sqrt{4.82^2 - 3.204^2} = 3.601\,\mathrm{A}$$

$$X_M = \frac{V_0/\sqrt{3}}{I_M} = \frac{400/\sqrt{3}}{3.601} = 64.133\,\Omega$$

Таблица 4 Результаты вычислений опыта без нагрузки

Параметр	Значение
r_1	1,45 Ом
r_2'	1,898 Ом
x	4,572 Ом
R_L	72,072 Ом
X_M	64,133 Ом

Опыт с нагрузкой

Цель этого опыта – измерить нагрузочные характеристики (момент - скольжение) и сравнить их с характеристиками, определёнными схемой замещения. Для проведения опыта двигатель должен быть запущен при нулевом моменте нагрузки (бегунок Tmech установить в 0) и при номинальном напряжении питания 400 В. Процедура запуска такая же, что и в предыдущем опыте.

Когда двигатель перейдет в режим стабильной работы (то есть все отображаемые электрические величины перестанут изменяться), при заданном напряжении статора и нулевом моменте нагрузки, запишите показания измерительных элементов I_L и P в цепи статора, скорость двигателя (в оборотах в минуту) и момент нагрузки (в Ньютон-метрах). Цифровое значение показано в окне внизу бегунка Tmech.

После того, как значения параметров двигателя будут записаны, увеличьте приложенный к двигателю момент нагрузки до 2 Нм, используя “Tmech”. Вы должны увидеть уменьшение скорости вращения и

повышение тока статора, поскольку двигателю необходимо увеличить создаваемый момент вращения для противодействия увеличенному механическому моменту нагрузки. Запишите показания измерительных элементов I_L и P в цепи статора, скорость двигателя (в оборотах в минуту) и момент нагрузки (в Ньютон-метрах).

Продолжайте увеличивать момент нагрузки с шагом 2 Нм. На каждом шаге дожидайтесь установившегося режима работы перед записью параметров. Повторяйте измерения, пока не достигните значения момента 18 Нм, который должен примерно соответствовать номинальному току статора тестируемого виртуального двигателя.

Таблица 5. Результаты вычислений опыта с нагрузкой

T_{LOAD} (Нм) момент нагр.	speed (Об/мин) скорость	P (Вт) мощность	I_L (A) ток
0	1495	2220	4,82
2	1488	2535	5,12
4	1482	2855	5,47
6	1476	3175	5,83
8	1469	3495	6,22
10	1463	3820	6,62
12	1456	4150	7,04
14	1449	4475	7,48
16	1442	4810	7,93
18	1435	5145	8,39

Постройте графики зависимости момента нагрузки (ось Y) от скольжения (ось x) по снятым данных. В той же плоскости постройте график нагрузочной характеристики, определяемые эквивалентной схемой замещения двигателя, и сравните кривые.

Сравнение опытов с нагрузкой при разных значениях сопротивления ротора

Цель этого опыта – измерить нагрузочные характеристики двигателя при двух дополнительных значениях сопротивления ротора исследуемого виртуального двигателя и сравнить их с характеристиками, полученными для номинального значения сопротивления в предыдущем опыте. Позже вы сможете увидеть эффект от увеличения сопротивления ротора по переходным процессам двигателя, измеренным во время процедуры прямого пуска.

Остановите моделирование и откройте подгруппу “Rotor Resistance” внизу-справа области главного окна RUNTIME. Вы должны увидеть схему, показывающую переменное сопротивление трех фаз ротора, и бегунок, позволяющий вам настраивать величину сопротивления ротора (если моделирование все еще запущено, этот бегунок будет иметь серый цвет – его значение может быть изменено, только при остановленном моделировании). Измените сопротивление ротора, используя бегунок, от установленного номинального значения (0,06763 на элемент) до значения 0,13526 на элемент (оно соответствует двойному номинальному значению).

Опять запустите моделирование нажатием кнопки “Run Case” в программе RUNTIME. Вы увидите диалоговое окно, извещающее вас о том, что установки были изменены, и спрашивающее, желаете ли вы перекомпилировать модель в новый исполняемый код комплекса моделирования. Нажмите кнопку Yes и модель перекомпилируется с новым значением сопротивления.

Теперь процесс моделирования должен стартовать. Разъедините цепь статора и, используя переключатель “Select Test”, подключите нагрузку к двигателю.

Увеличьте входное напряжение до номинального значения (400 В), проверьте, чтобы момент нагрузки, приложенный к ротору, был установлен в 0. Замкните цепь питания ротора для пуска двигателя на полном напряжении и при нулевой нагрузке (прямой пуск).

Перед тем как продолжать измерения, откройте подгруппу “Time Plots”/«Осциллограммы» в правом нижнем углу главной страницы RUNTIME. Вы должны увидеть три набора графических окон, показывающих переходных процессы токов статора, скорости вращения и электрического момента во время прямого пуска двигателя, который вы только что выполнили. Все три набора графических окон показывают одинаковые наборы графиков – это дает возможность блокировки окна диаграммы после выполнения прямого пуска двигателя при соответствующем частном значении сопротивления ротора. Это означает, что вы можете отдельно повторить прямой пуск для трех разных значений сопротивления (номинальное, двойное

номинальное и тройное номинальное), блокируя одну из трех осциллограмм после каждого запуска. Затем вы можете сравнить поведение электрических величин в переходных режимах.

Повторите действия, выполненные ранее в течение опыта с нагрузкой при номинальном значении сопротивления ротора, делая записи в установившихся состояниях I_L и P в цепи статора, скорости движения и момента нагрузки с шагом 2 Нм в диапазоне от 0 до 18 Нм.

Таблица 6. Результаты вычислений опыта с нагрузкой при двойном сопротивлении ротора

T_{LOAD} (Нм) момент нагр.	speed (Об/мин) скорость	P (Вт) мощность	I_L (A) ток
0	1489	2220	4,82
2	1477	2535	5,13
4	1464	2855	5,46
6	1451	3174	5,83
8	1439	3495	6,22
10	1425	3825	6,62
12	1412	4147	7,05
14	1399	4479	7,48
16	1385	4810	7,94
18	1371	5145	8,38

Когда вы выполните все необходимые замеры, остановите моделирование, установите бегунок сопротивления ротора в значение 0,20289 на элемент (утроенное номинальное).

Запустите моделирование снова нажатием кнопки “Run Case”. Вы опять увидите диалоговое окно, уведомляющее вас о том, что установки были изменены, и запрашивающее ваше желание перекомпилировать модель макетной цепи. Нажмите кнопку Yes и перекомпиляция с новыми значениями сопротивления ротора запустится.

После запуска процесса моделирования разъедините цепь статора и, используя переключатель “Select Test”, подключите нагрузку к двигателю.

Увеличьте входное напряжение до номинального значения (400 В), проверьте, чтобы момент нагрузки, приложенный к ротору, был установлен в 0. Замкните цепь питания ротора для прямого пуска двигателя.

Еще раз повторите действия замера значений, выполненные в предыдущих двух опытах с нагрузкой.

Таблица 7. Результаты вычислений опыта с нагрузкой при тройном сопротивлении ротора

T_{LOAD} (Нм) момент нагр.	speed (Об/мин) скорость	P (Вт) мощность	I_L (A) ток
0	1484	2220	4,81
2	1465	2535	5,13
4	1446	2855	5,47
6	1427	3175	5,83
8	1408	3498	6,22
10	1388	3822	6,62
12	1368	4148	7,05
14	1348	4480	7,48
16	1327	4810	7,94
18	1306	5147	8,38

Когда вы выполните все необходимые замеры, остановите моделирование.

Для каждого из трех значений сопротивления ротора постройте графики зависимостей момента нагрузки, тока статора, КПД, коэффициента мощности статора от скольжения. Подпишите графики, объясните, как и почему изменяется каждая величина в зависимости от скольжения, и как значение сопротивления ротора влияет на их поведение. По вашим результатам объясните, как дополнительное сопротивление ротора может быть использовано в асинхронных двигателях, его преимущества и недостатки.

Примеры графических результатов опытов

Примеры графических результатов описанных выше опытов показаны ниже.

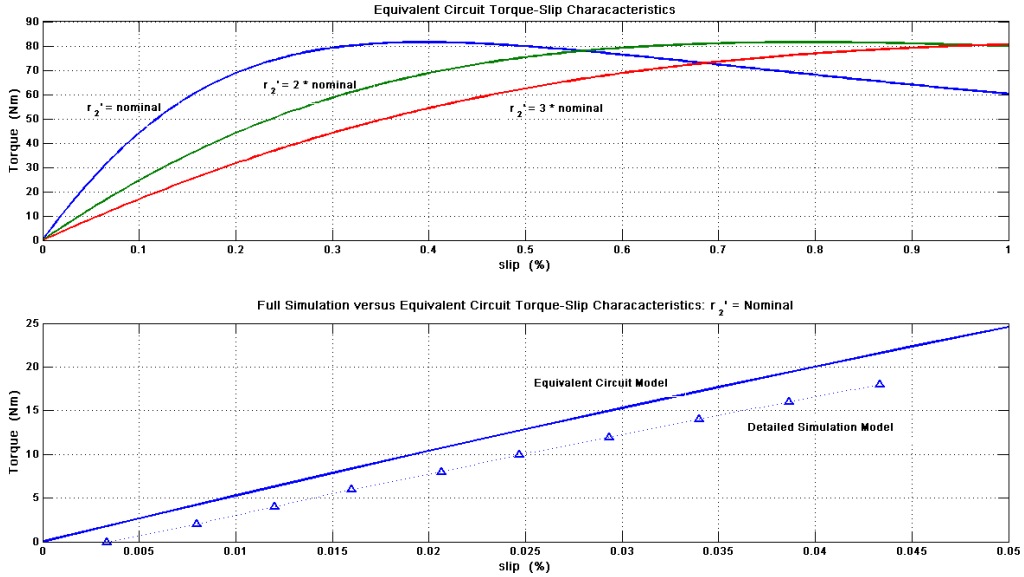

Рисунок 5. Кривые зависимостей момента от скольжения асинхронного двигателя, построенные для различных значений сопротивления ротора, используя измеренные параметры эквивалентной схемы замещения (верхний график). Сравнение кривых зависимостей момента от скольжения под нагрузкой для номинального значения сопротивления ротора, определенные из эквивалентной схемы замещения, и результатов опыта на детальной модели двигателя (виртуального двигателя) из библиотеки RSCAD RTDS.

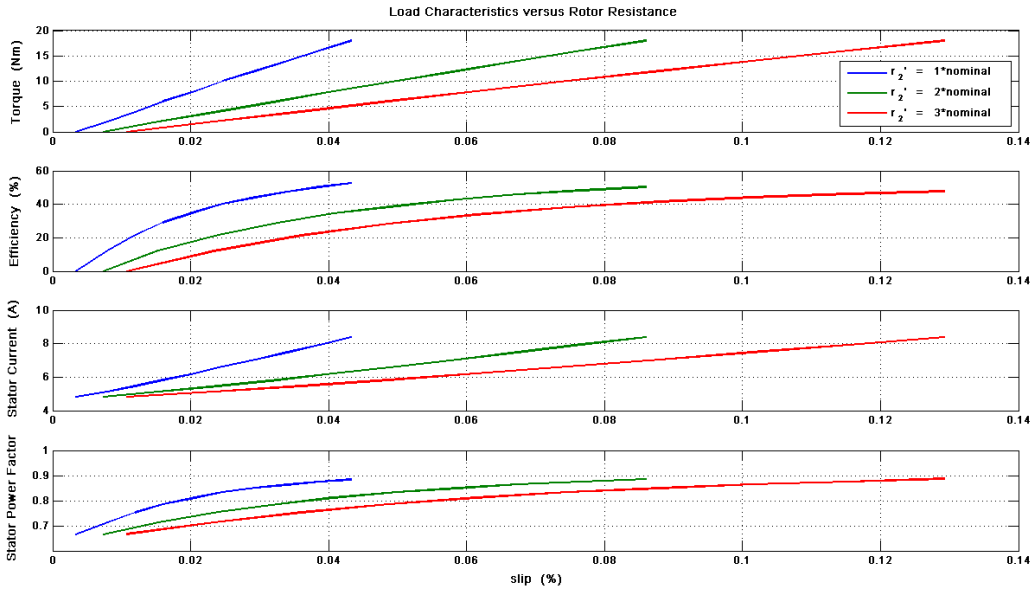

Рисунок 6. Сравнение зависимостей параметров виртуального двигателя: момента, кпд, тока статора и коэффициента мощности от скольжения для трех различных сопротивлений ротора.

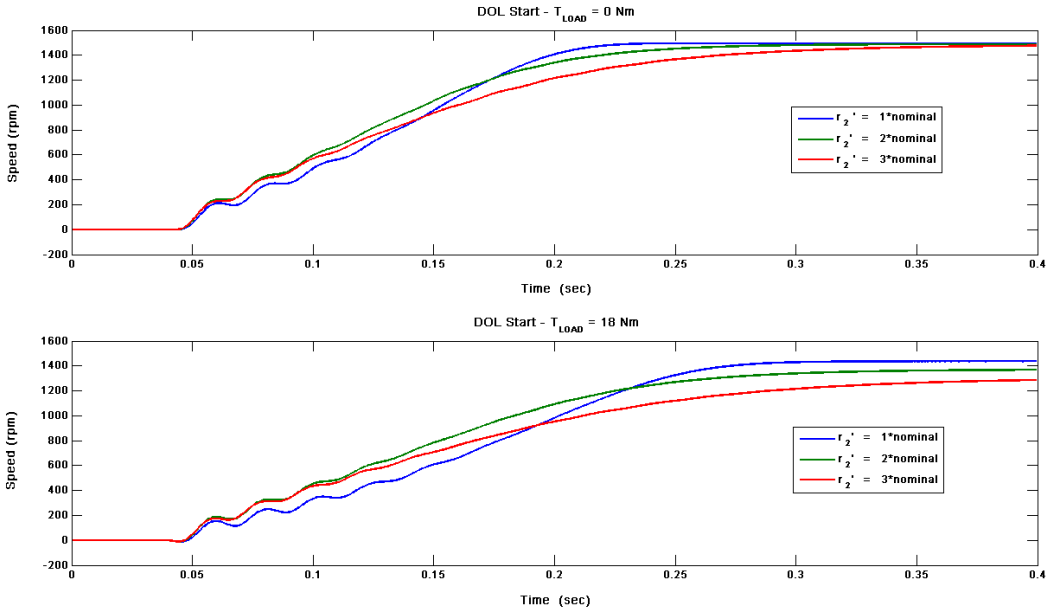

Рисунок 7. Сравнение переходных процессов при нарастании скорости виртуального асинхронного двигателя в процессе прямого пуска при отсутствии нагрузки (верхний график) и при приложенной нагрузке (нижний график). Графики даны для трех значений сопротивления ротора.

Ускорение двигателя выше на низких скоростях - это результат добавления сопротивления в ротор. Это делается по причине высокого момента, развиваемого двигателем при запуске (см. верхний график рисунка 5). Далее, для более высоких сопротивлений ротора изменение скорости становится малозаметным при прохождении двигателем области максимального скачка момента. В итоге двигатель переходит в область почти линейной кривой «момент-скольжение» уже для всех значений сопротивления (см. верхний график рисунка 5).