МОДЕЛЬ БЕСЩЕТОЧНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

MODEL OF A BRUSHLESS EXCITATION SYSTEM

УДК 621.313

Баширов Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, E-mail: eapp@yandex.ru

Юсупова Ильвина Гамировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, E-mail: ilvina011@mail.ru

Файзуллина Гульназ Равиловна, магистрант направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», кафедра «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, E-mail: kioko2210@yandex.ru

Bashirov Mussa Gumerovich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department «Electrical equipment and automation of industrial enterprises», Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Salavat, E-mail: eapp@yandex.ru

Yusupova Ilvina Gamirovna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Electrical equipment and automation of industrial

enterprises», Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Salavat, E-mail: ilvina011@mail.ru

Fayzullina Gulnaz Ravilovna, Master's student in the direction of training 13.04.02 «Electricity and Electrical Engineering», department «Electrical equipment and automation of industrial enterprises», Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Salavat, E-mail: kioko2210@yandex.ru

Аннотация

Неотъемлемой частью синхронных машин является система возбуждения. Система возбуждения предназначена для питания обмотки возбуждения генератора, автоматически регулируемым постоянным током. В статье рассмотрена модель бесщеточного возбудителя синхронной машины. Выполнен анализ данных, полученных при моделировании.

Annotation

An integral part of synchronous machines is the excitation system. The excitation system is designed to power the excitation winding of the generator, automatically controlled by direct current. The article discusses a model of a brushless synchronous machine exciter. The analysis of the data obtained during the simulation has been carried out.

Ключевые слова: синхронны двигатель, система возбуждения, бесщеточная система возбуждения

Keywords: synchronous motor, excitation system, brushless excitation system

Однофазная эквивалентная схема может использоваться для моделирования схемы статора независимо от диодного выпрямителя и обмотки возбуждения в цепи ротора, когда сопротивление обмотки возбуждения невелико по сравнению с сопротивлением машины возбуждения. Большой индуктивностью обмотки возбуждения можно пренебречь, если предполагается, что ток возбуждения представляет собой плавный постоянный ток. По

измерениям короткозамкнутый диодный мост соответствует короткозамкнутому ротору без диодного моста. Измерения проводились с использованием токосъемной машины в качестве возбуждающей машины.

К токосъемным кольцам был подключен шестиимпульсный диодный мост. Нагрузка варьировалась подключением нагрузок с разным сопротивлением и индуктивностью к шинам постоянного тока диодного моста. Скольжение изменялось вращением ротора токосъемной машины с помощью машины постоянного тока. Проскальзывание было изменено от ротора, вращающегося с синхронной скоростью в том же направлении, что и поле статора (s = 0) в ситуации заблокированного ротора (s = 1), и, кроме того, ротор вращался с синхронной скоростью, но в направлении, противоположном полю статора (s = 2). Напряжение статора токосъемника поддерживалось постоянным. Измеренные амплитуды основных гармоник фазного тока ротора при различных нагрузках, подключенных к диодному мосту, представлены на рис. 4 в зависимости от скольжения. Также представлен случай с короткозамкнутыми обмотками ротора без диодного моста.

В реальных машинах возбуждения индуктивность обмотки возбуждения очень велика по сравнению с индуктивностью машины возбуждения. Из-за высокого скольжения возбуждающей машины можно предположить, что эквивалентная схема замкнута накоротко с заблокированным ротором. Для возбуждающей машины, как показано на рисунке 1, не имеет значения, равно ли скольжение единице или больше. Однофазная схема замещения асинхронной машины представлена на рисунке 2.

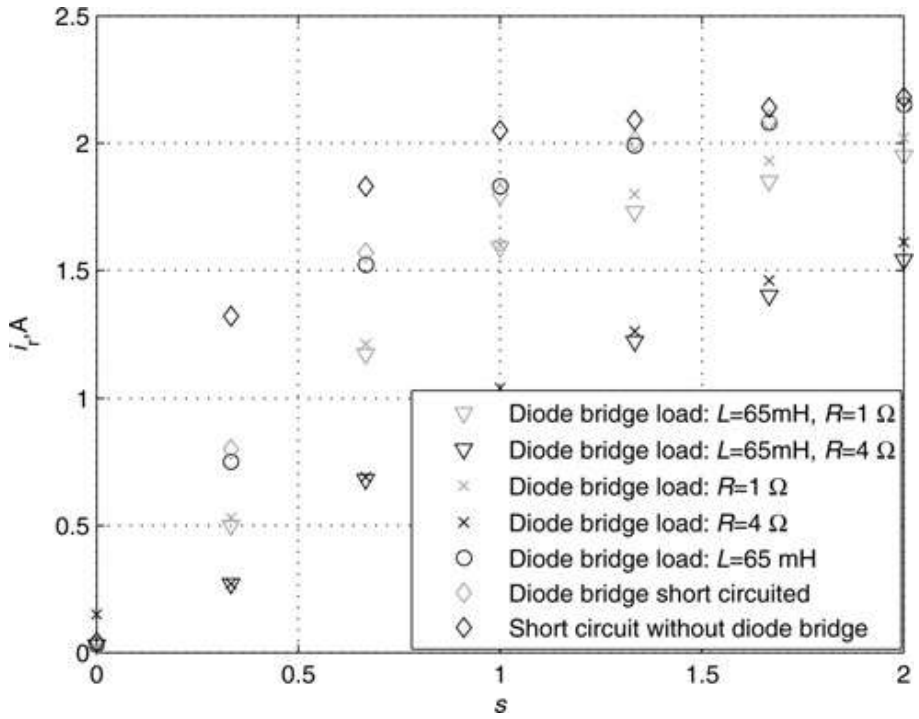

Рисунок 1 – Амплитуды основной гармоники фазного тока ротора токосъемной машины с диодным мостом с различной нагрузкой, подключенным к контактным кольцам, как функция скольжения

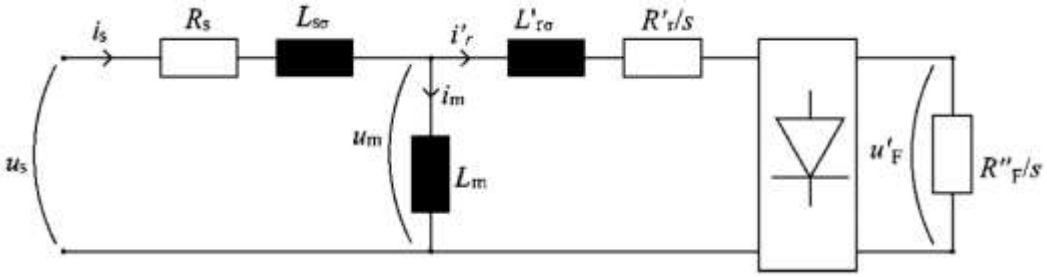

Рисунок 2 – Однофазная схема замещения возбуждения машины

Напряжение намагничивания можно рассчитать по напряжению статора и току статора

$$u_m = u_s - R_s i_s - jL_s \omega_s i_s, \quad (1)$$

где R_s - сопротивление обмотки статора;

L_s - паразитная индуктивность статора и в зависимости от угловой скорости потока статора.

Ток статора можно рассчитать по напряжению статора и импедансу как

$$i_s = \frac{u_s}{Z_s + \left(\left(Z_m Z_r \right) / \left(Z_m + Z_r \right) \right)}, \quad (2)$$

где Z_s - полное сопротивление статора;

Z_m - полное сопротивление намагничивания;

Z_r - полное сопротивление ротора.

Импедансы определяются как

$$Z_s = R_s + j\omega_s L_s; \quad (3)$$

$$Z_m = j\omega_s L_m; \quad (4)$$

$$Z_r = \frac{R'_r}{s} + \frac{R''_F}{s} + j\omega_s L'_r, \quad (5)$$

где R`r - сопротивление обмотки ротора относительно статора;

s – скольжение;

R_F`` - трехфазное эквивалентное сопротивление обмотки возбуждения, относящееся к статору;

L`$_r$ - паразитная индуктивность ротора относительно статора. Электродвижущая сила ротора определяется напряжением намагничивания u_m, скольжением s и коэффициентом уменьшения n между статором и ротором

$$u_r = u_m sn. \quad (6)$$

Фазовые напряжения для машины могут генерироваться с помощью амплитуды напряжения ротора и частоты ротора.

В цепи ротора имеется 12 различных комбинаций направления фазного тока. Если только две фазы являются проводящими, существует шесть различных комбинаций токов, которые выбираются как нечетные состояния.

Между нечетными состояниями все три фазы проводят по крайней мере в течение короткого интервала времени коммутации; текущие комбинации, в которых все фазы являются проводящими, выбираются как четные состояния. Двусторонняя стрелка показывает текущую коммутацию. Все возможные состояния ротора представлены в таблице 1. Положительное направление тока выбирается от обмотки ротора к диодному мосту. Первая буква указывает на положительный ток, а вторая - на отрицательный.

Таблица 1 – Состояния ротора

Положение	Фазы
1	cb
2	cb ← → ab
3	ab
4	ab ← → ac
5	ac
6	ac ← → bc
7	bc
8	bc ← → ba
9	ba
10	ba ← → ca
11	ca
12	ca ← → cb

Направления токов цепи ротора в первом состоянии cb представлены на рисунке 3.

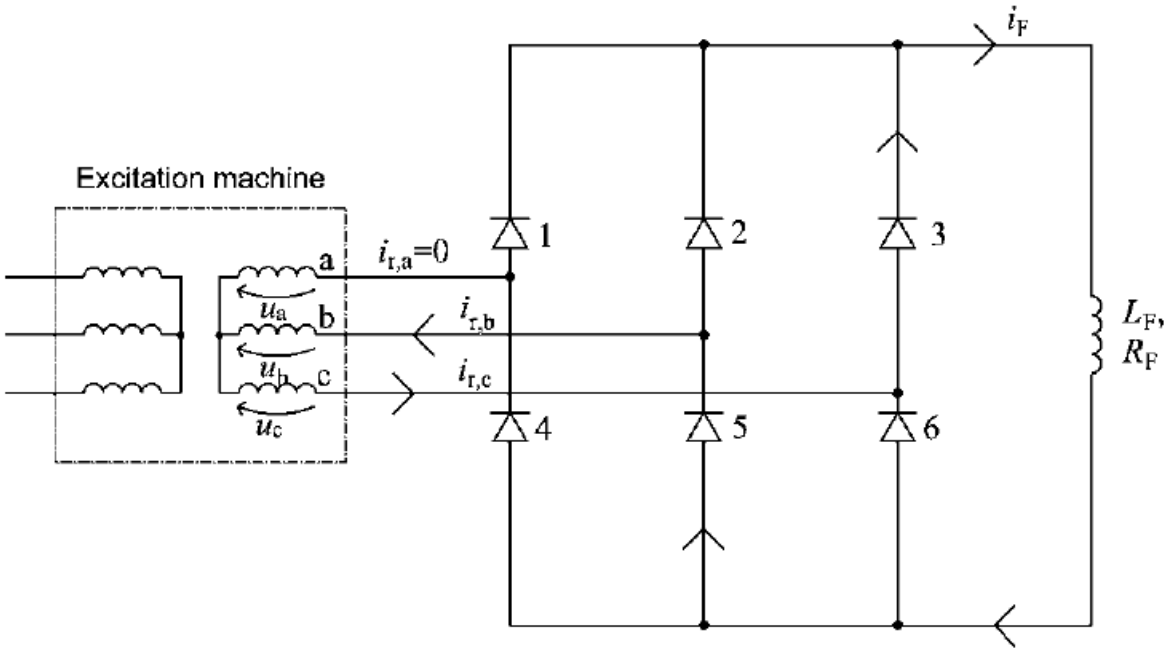

Рисунок 3 – Направления токов цепи ротора в первом состоянии cb

Если пренебречь сопротивлениями диодов и пороговыми напряжениями, уравнение напряжения для первого состояния будет иметь вид

$$\left[u_c - u_b\right] = \left[2R_r - R_F\right]\left[i_c\right] + \left[2L_r - L_F\right]\left[\frac{di_c}{dt}\right], \tag{7}$$

где R_r - сопротивление фазы ротора.

Уравнения напряжения для всех нечетных состояний имеют одинаковые матрицы усиления; изменяются только проводящие фазы.

Во время коммутации все фазы ротора являются проводящими. Направления токов во втором состоянии показаны на рисунок 4. В четных состояниях необходимо решить два тока ротора. Уравнения напряжения для второго состояния следующие:

$$\begin{bmatrix} u_c - u_b \\ u_c - u_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_r + R_F) & R_r \\ R_r & 2R_r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(L_r + L_F) & L_r \\ L_r & 2L_r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix}, \tag{8}$$

Аналогичным образом формируются уравнения напряжения для остальных состояний. И матрицы усиления, и фазы меняются.

Коммутация между состояниями основана на напряжениях и токах. Конечный автомат переходит из нечетного состояния в четное, когда напряжение непроводящей фазы достигает значения проводящей фазы с той же полярностью. Например, при вращении в положительном направлении переход от первого (cb) ко второму состоянию (cb ← → ab) происходит, когда напряжение фазы a достигает значения фазы c.

Изменение состояния с четного на нечетное происходит, когда одна из фаз перестает проводить, когда она достигает нулевого тока. Например, при вращении в отрицательном направлении состояние конечного автомата меняется со второго состояния на первое, когда ток фазы a падает до нуля.

Ток обмотки возбуждения может свободно течь через диодный мост, не проходя через обмотку ротора машины возбуждения; это известно как состояние свободного хода. В состоянии холостого хода ток ротора может свободно уменьшаться, в то время как ток возбуждения продолжает проходить через диодный мост, затухая из-за резистивных потерь в диодах и обмотке возбуждения.

В состоянии холостого хода ток возбуждения состоит из тока ротора и тока холостого хода. Эффект свободного хода удваивает количество состояний ротора. Состояния свободного хода эквивалентны состояниям, представленным выше, но сопротивлением и индуктивностью обмотки возбуждения пренебрегают. В этом случае конечный автомат ротора генерирует только фазные токи ротора. Ток обмотки возбуждения необходимо рассчитывать отдельно с помощью модели демпфирующего тока. Если предположить, что токи ротора возбуждающей машины малы, уравнение напряжения для тока возбуждения записывается как

$$0 = R_F i_F + L_F \frac{di_F}{dt}. \quad (9)$$

Модель системы возбуждения была построена и смоделирована с помощью Matlab Simulink. Результаты сравнивали с измеренными значениями. Измеряемая машина представляет собой небольшую индукционную машину с контактным кольцом, питаемую от трансформатора переменного напряжения. К контактным кольцам ротора был подключен шестиимпульсный диодный мост. На диодный мост была вставлена ветвь RL для имитации обмотки возбуждения. Напряжения статора моделируемой и измеренной токосъемной машины были установлены равными, а токи ротора сравнивались друг с другом.

Система была смоделирована и измерена при нулевой скорости, что означает, что скольжение равно единице. Смоделированные и измеренные токи представлены на рисунке 4.

Амплитуды моделируемого и измеренного токов практически равны. Небольшая разница является следствием неточности модели и параметров для токосъемника. Измеряемый ток постоянно находится в стабильном состоянии. В моделированном токе можно определить постоянную времени системы возбуждения. Частота токов ротора равна частоте статора, потому что ротор неподвижен. Формы измеренных токов на верхнем рисунке совпадают с смоделированными токами, приведенными ниже. Имеется лишь небольшая пульсация постоянного тока возбуждения.

Трапецеидальную форму фазных токов можно объяснить токовыми коммутациями. На нулевой скорости состояние свободного хода не заметно.

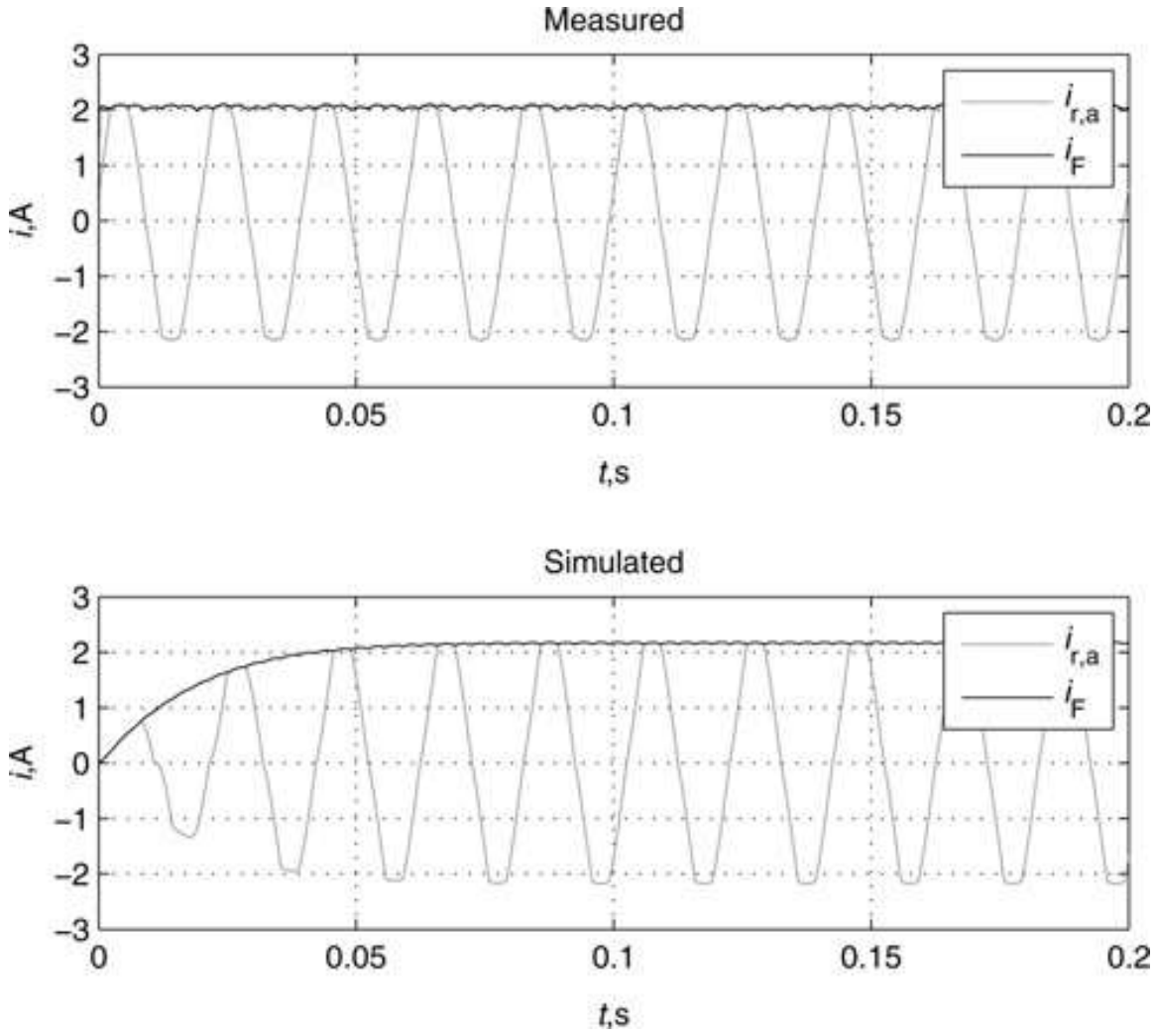

Рисунок 4 – Однофазный ток ротора и ток обмотки возбуждения при нулевой скорости

Когда ротор вращается в направлении, противоположном направлению потока статора, скольжение больше единицы, а частота ротора выше, чем частота статора. Измеренные и моделируемые токи при скольжении равные двум представлены на рисунке 5.

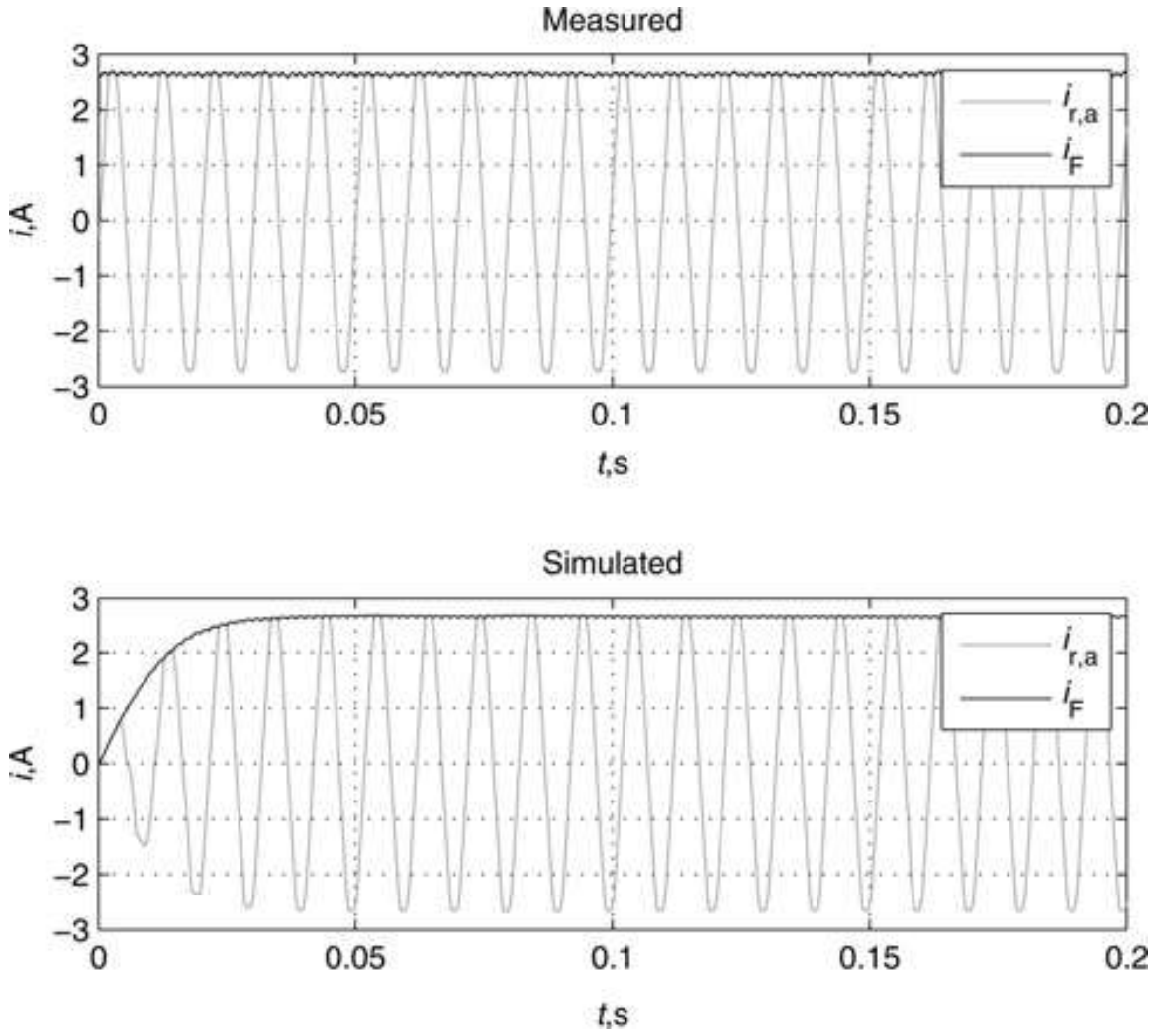

Рисунок 5 – Ток возбуждения и ток одной фазы ротора измерены и смоделированы при скольжении, равном двум

Частота ротора вдвое больше по сравнению с ситуацией с заблокированным ротором. Следовательно, электродвижущая сила ротора в два раза больше значения в ситуации заблокированного ротора на основании формулы 3.2.6. Амплитуды тока ротора лишь немного выше, чем указано выше, из-за увеличения импеданса ротора. Это оправдывает использование однофазной схемы замещения. Постоянная времени цепи ротора теперь меньше, чем при нулевой скорости. Влияние импеданса обмотки возбуждения уменьшается, потому что и электродвижущая сила, и импеданс цепи ротора увеличиваются при увеличении скольжения. Токи представлены в более коротком интервале на рисунке 6 для наблюдения за формой токов.

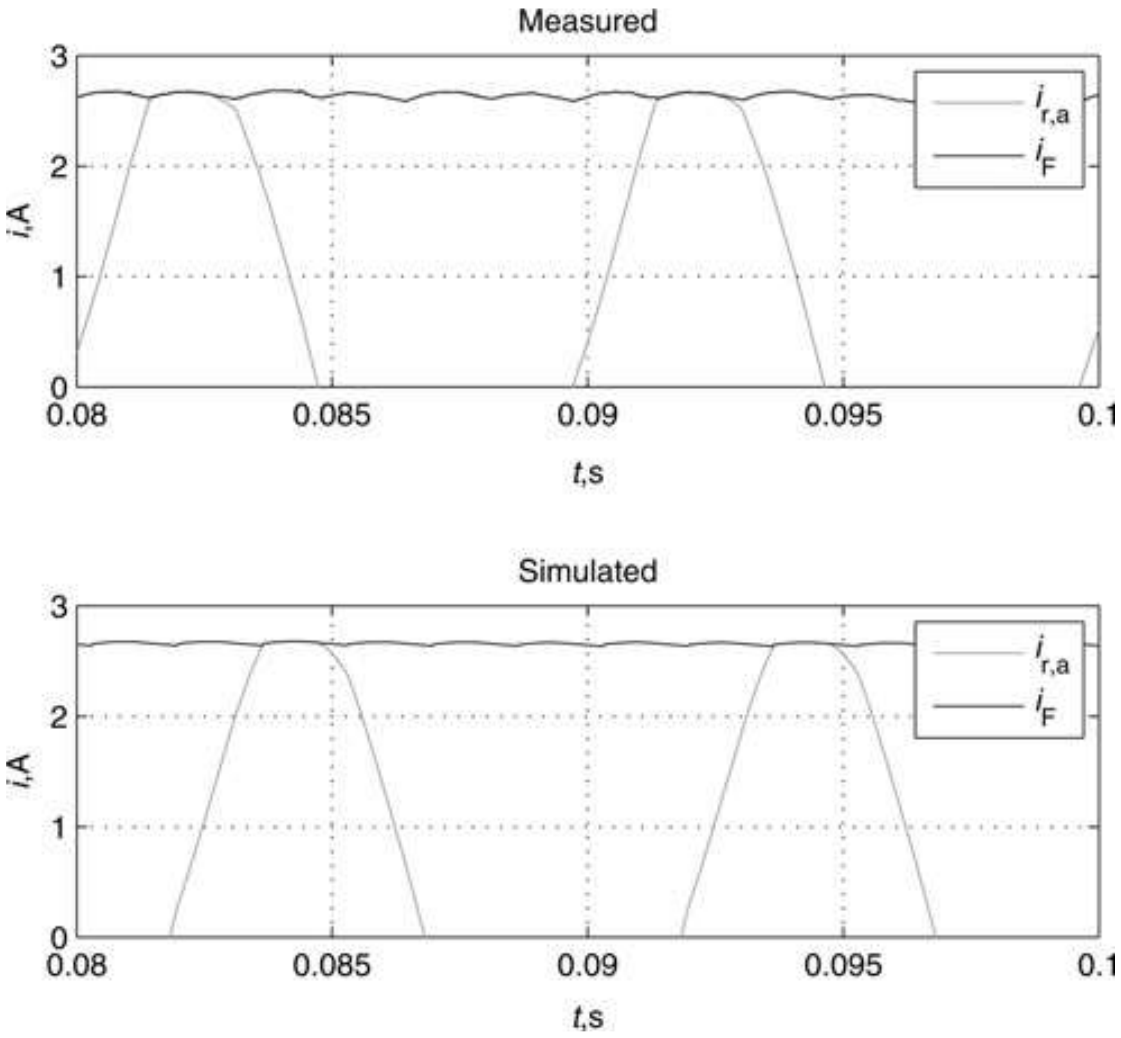

Рисунок 6 – Более подробный вид токов токосъемной машины, измеренных и смоделированных при скольжении, равном двум

Литература

1. Сусена Пайва, Хосе Педро «Redes de Energia Eléctrica: uma Análise Sistémica», IST Press 2005
2. Кабир, С. andShutleworth, R. «Модели бесщеточных возбудителей», IEEE Proc.-Gener. Трансм. Dirtib., Vol. 141, No. 1, январь 1994 г.
3. С. Чакраборти, С. Басак и Ю. Т. Рао, “Новая серия бесщеточных и синхронных машин без постоянных магнитов”, Международный симпозиум по промышленной электронике (ISIE), Эдинбург, 2017, стр. 1425-1430.

4. Р. С. Шефер, ”Применение систем статического возбуждения в промышленности IEEE”, Журнал приложений, том 4, № 6, стр. 41-49, ноябрь-декабрь 1998 года.
5. Р. Торнтон-Джонс, И. Голайтли, Н. Гаттеридж, К. Хьюизер и Д. Навратил, ”Обзор спецификаций генератора и системы возбуждения и требования к тестированию для удовлетворения нескольких международных стандартов сетевого кода”, Общее собрание IEEE Power and Energy Society 2012, Сан-Диего, Калифорния, 2012, стр. 1-2.
6. Файкаль Бенсмейн, Абдалла Баракат, Слим Тнани, Жерар Шампенуа, Эмиль Муни, ”Двойное управление синхронным генератором для регулирования напряжения на клеммах-сравнение с одним управлением”, Электроэнергия, Системные исследования, Том 91, 2012, стр. 78-86

Literature

1. Sucena Paiva, José Pedro“Redes de Energia Eléctrica : uma Análise Sistémica”, IST Press 2005.
2. Kabir, S.M.L. andShutleworth, R. “Brushless exciter models”, IEEE Proc.-Gener. Transm. Dirtib., Vol. 141, No. 1, January 1994.
3. C. Chakraborty, S. Basak and Y. T. Rao, “A New Series of Brushless and Synchronous Machines without Permanent Magnets,” International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 2017, pp. 1425-1430.
4. RS Schaefer, “Application of Static Excitation Systems in the IEEE Industry,” Application Journal, Vol. 4, No. 6, pp. 41-49, Nov-Dec 1998.
5. R. Thornton-Jones, I. Golightly, N. Gutteridge, C. Huyser and D. Navratil, “Overview of Oscillator and Excitation System Specifications and Test Requirements to Meet Several International Network Code Standards,” IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012 , San Diego, CA, 2012, pp. 1-2.
6. Faikal Bensmein, Abdallah Barakat, Slim Tnani, Gerard Champenois, Emile Mooney, “Dual Control of a Synchronous Generator for Terminal Voltage Regulation - Comparison with One Control”, Electricity, Systems Research, Vol. 91, 2012, p. 78-86