

УДК 621.313

Исследование расчетной модели самовозбуждения асинхронной машины

А.Н. Андреев, Е.В. Несговоров, Д.А. Колесниченко
ФГБОУВПО «Вологодский государственный технический университет», Вологда, Российская Федерация
E-mail: aancs@mail.ru, e.nesg@mail.ru, dimakolesnichenko@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: В большинстве современных частотно-регулируемых асинхронных приводов применительно к некоторым классам механизмов существуют режимы, при которых асинхронная машина работает генератором. Эти режимы слабо исследованы и мало изучены, для их адекватной оценки требуется уточнение известных моделей самовозбуждения и их сравнительный анализ с реальным объектом.

Материалы и методы: Расчетная модель построена на базе общепринятой двухфазной модели асинхронного двигателя с введением в систему уравнения для подключаемого к обмоткам статора конденсатора, а также с введением нелинейности в виде кривой намагничивания машины, полученной экспериментальным путем.

Результаты: Получены результаты численного и физического моделирования. Показано, что построенная модель с приемлемой точностью описывает динамический и установившийся процессы самовозбуждения асинхронной машины.

Выводы: Доказано, что для описания генераторных режимов асинхронного электропривода возможно использование базовой двухфазной модели.

Ключевые слова: самовозбуждение асинхронного генератора, асинхронная машина.

Research of theoretical model of self-excited asynchronous machine

A.N. Andreev, E.V. Nesgovorov, D.A. Kolesnichenko
Vologda State Technical University, Vologda, Russian Federation
E-mail: aancs@mail.ru, e.nesg@mail.ru, dimakolesnichenko@gmail.com

Abstract

Background: Most modern variable-speed induction motor drives are working in conditions when the machine is running as a generator. These modes are poorly studied. For an accurate assessment it is necessary to clarify the known theoretical self-excited models and to make their comparative analysis with the real object.

Materials and methods: The theoretical model is based on common base of two-phase induction motor model with the introduction of the system of equations for a capacitor that is connected to the stator winding and the magnetization curve, which is obtained by the experimental method.

Results: The results of numerical and physical modeling showed that the model describes the dynamic and static modes of self-excitation of induction machine with reasonable accuracy.

Conclusions: it has been proved that for generative modes of the asynchronous electric drive the basic two-phase model of the asynchronous machine can be used.

Key words: self-excitation of asynchronous machine, asynchronous machine.

В современной литературе регулярно рассматриваются динамические процессы двигательного режима работы асинхронных машин, что при исследовании большинства регулируемых асинхронных электроприводов является достаточным. Однако генераторный режим работы также актуален, в особенности для механизмов, обладающих значительным моментом инерции, таких как транспортные и подъемные механизмы, а также кузнечно-прессовое оборудование и ряд других, в которых возможен процесс возврата части кинетической или потенциальной энергии. Возвращаемая энергия рассеивается на тормозном резисторе преобразователя, рекупируется в сеть либо накапливается во внутреннем конденсаторе преобразователя при достаточной его емкости.

В большинстве источников [1, 2] рассматривается процесс в предположении установив-

шихся режимов, динамическая составляющая не затрагивается. Описывается подход к выбору необходимой емкости для самовозбуждения генератора и выхода его в номинальную точку либо условие перехода двигателя, запитанного от сети, из двигательного режима в генераторный при увеличении скорости приводного механизма под воздействием внешних сил.

Представляется целесообразным рассмотреть динамических режимов асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором в автономном режиме при его самовозбуждении от батареи конденсаторов, создание математической модели для описания протекающих процессов и экспериментальной установки для проверки результатов, полученных математическим путем.

Базовая схема подключения автономного асинхронного генератора и описание процесса

самовозбуждения приведены в [1]. Необходимым условием возбуждения является наличие конденсаторов в цепи статора, являющихся источником реактивной энергии.

Условия самовозбуждения выделяются на основе характеристики кривой намагничивания и кривых падения напряжения на конденсаторе. Емкость конденсатора должна лежать в определенных пределах, в противном случае точка пересечения кривых будет лежать или в зоне слишком малых ЭДС, либо возможно отсутствие точки пересечения при малых значениях угла α (угла наклона прямой падения напряжения на конденсаторе). Согласно [2], величина емкости определяется следующим образом:

$$C = \frac{1}{\omega_1^2 L_1} = \frac{1}{\omega_1(X_{\sigma 1} + X_{\mu})}, \quad (1)$$

где ω_1 – угловая частота выходного напряжения; L_1 – индуктивность статора; $X_{\sigma 1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния статора; X_{μ} – индуктивное сопротивление намагничивающего контура.

Формула для определения необходимой величины емкости получается из условия, что индуктивность намагничивания и внешняя емкость, подключенная к статору машины, образуют резонансный контур. Частота колебаний определяется величинами емкости и индуктивности.

Тип исследуемой машины и ее параметры приведены в табл. 1. Рассчитанная величина емкости, необходимая для возбуждения генератора, округлена до ближайшего значения из стандартного ряда. Для машины, параметры которой приведены в табл. 1, величина емкости равна 24 мкФ. Для экспериментальных исследований использовались конденсаторы МБГЧ (16, 16, 8, 4 и 4 мкФ) и их сочетания для номинальной частоты токов статора машины 50 Гц.

Таблица 1. Параметры исследуемой машины

Тип машины	4А80В4У3
R_1	9,282 Ом
R'_2	5,003 Ом
$L_{\sigma 1}$	0,019 Гн
$L'_{\sigma 2}$	0,028 Гн
L_{μ}	0,434 Гн
J	$3,2 \cdot 10^{-3}$ кг·м ²
p	2

Достаточно часто для моделирования процесса самовозбуждения асинхронного генератора используется схема, приведенная в [2]. Однако информация, полученная в ходе математического моделирования при использовании этой схемы, для случая, когда скорость вращения равна скорости вращения магнитного поля обмоток статора ($s = 0$) (рис. 1), позволяет судить о процессе возбуждения только качественно, что не дает возможности использовать ее при расчетах в исходном виде.

Для количественной оценки предлагается использовать систему дифференциальных уравнений для асинхронной машины в двухфазной неподвижной относительно статора системе координат.

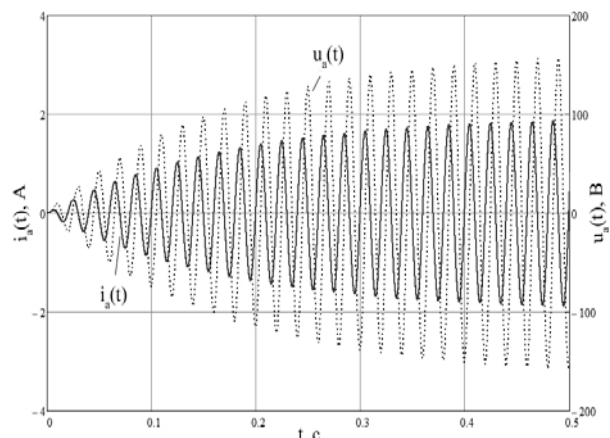


Рис. 1. Процесс самовозбуждения асинхронного генератора

При этом принимаются следующие допущения:

- питающая трехфазная система симметрична;
- воздушный зазор является одинаковым по всей длине окружности магнитной системы;
- каждый протекающий по фазной обмотке ток создает магнитодвижущую силу, синусоидально распределенную по длине окружности воздушного зазора асинхронной машины;
- сложение МДС отдельных фазных обмоток порождает общую магнитную индукцию, также синусоидально распределенную в воздушном зазоре;
- характеристика намагничивания машины линейна, при этом параметры магнитной системы остаются постоянными;
- статор и ротор имеют симметричные обмотки.

В этом случае математическая модель фазы асинхронной машины имеет следующий вид:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d}{dt} \psi_1, \\ 0 = R_2 i_2 + \frac{d}{dt} \psi_2 - j \omega \psi_2, \\ \psi_1 = L_{\sigma 1} i_1 + L_{\mu} i_{\mu}, \\ \psi_2 = L_{\sigma 2} i_2 + L_{\mu} i_{\mu}, \end{cases} \quad (2)$$

где u_1 – напряжение статора; ω – угловая частота вращения ротора; $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния статора и ротора соответственно; R_1 , R_2 – активные сопротивления статора и ротора; ψ_1 , ψ_2 , i_1 , i_2 – потокосцепления и токи статора, ротора; L_{μ} – индуктивность намагничивания; $i_{\mu} = i_1 + i_2$ – ток намагничивания.

При численном решении общепринятой системы дифференциальных уравнений (2) совместно с уравнением для напряжения на конденсаторе не обеспечивается режим самовозбуждения и выход в расчетную точку. Следова-

тельно, необходимо уточнение математической модели путем учета реальной нелинейности кривой намагничивания, чем обеспечивается исключение одного из принятых допущений.

Для нахождения кривой намагничивания исследуемой машины проведены экспериментальные исследования, в которых снята зависимость $i_{\mu}(\psi_{\mu})$, которая аппроксимирована сплайном третьего порядка [3]:

$$i_{\mu}(\psi_{\mu}) = g_1 \psi_{\mu} + g_2 \psi_{\mu}^3 + g_3 \psi_{\mu}^5 + g_4 \psi_{\mu}^7.$$

Найдены коэффициенты полинома $g_1 \dots g_4$, и зависимость $i_{\mu}(\psi_{\mu})$ переведена в зависимость $L_{\mu}(\psi_{\mu})$, изображенную на рис. 2.

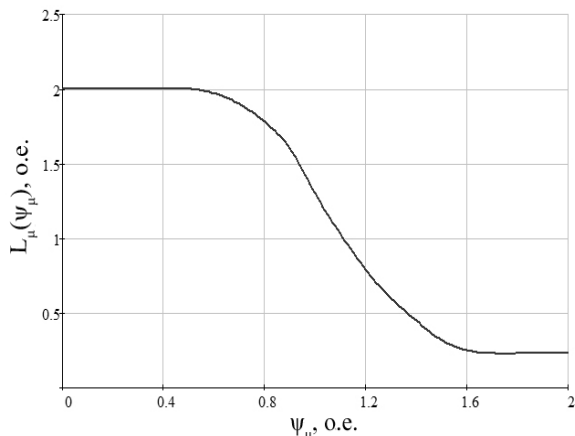


Рис. 2. Экспериментальная зависимость индуктивности намагничивания от потокосцепления намагничивания (в о.е.) для асинхронной машины 4А80В4У3

Система уравнений (2), дополненная уравнением для напряжения на конденсаторе, записывается относительно потокосцеплений:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 \left(\frac{\psi_1 - \psi_{\mu}}{L_{\sigma 1}} \right) + \frac{d}{dt} \psi_1, \\ 0 = R_2 \left(\frac{\psi_2 - \psi_{\mu}}{L_{\sigma 1}} \right) + \frac{d}{dt} \psi_2 - j \omega \psi_2, \\ u_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{C} \left(\frac{\psi_1 - \psi_{\mu}}{L_{\sigma 1}} \right) \right), \\ \psi_{\mu} = \frac{L_{\sigma 2} \psi_1 + L_{\sigma 1} \psi_2}{L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} + \frac{L_{\sigma 1} L_{\sigma 2}}{L_{\mu}(\psi_{\mu})}}. \end{cases} \quad (3)$$

Потокасцепление намагничивания выражено через потокасцепления статора и ротора, и принят ряд допущений:

- скорость вращения ротора постоянна и равна скорости поля машины;
- отсутствуют токи нулевой последовательности;
- отсутствует гистерезис;
- индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора постоянны и не зависят от основного магнитного потока машины.

Численное решение полученной системы при начальных условиях $\psi_{1,0} = 0$; $\psi_2 = \psi_{2,ост}$; $u_{1,0} = 0$ и величине емкости, рассчитанной выше, дает результат, приведенный на рис. 3. Остаточный

поток намагничивания задается при решении системы через пропорциональное ему значение потокосцепления ротора относительно номинального значения.

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели реальному объекту проведен ряд физических экспериментов при помощи системы сбора данных, параметры которой описаны в табл. 2. Результаты одного из таких экспериментов приведены на рис. 4, 5.

Таблица 2. Параметры используемого оборудования

Тип	Описание	Основные параметры
LEM LA-100	Датчик тока	$I = \pm 100 \text{ А}$, $f \leq 100 \text{ кГц}$
LEM LV-25p	Датчик напряжения	$U = \pm 1000 \text{ В}$, $f \leq 20 \text{ кГц}$
Lcard L783M	Система сбора данных	$f_{дискр} = 3 \text{ МГц}$

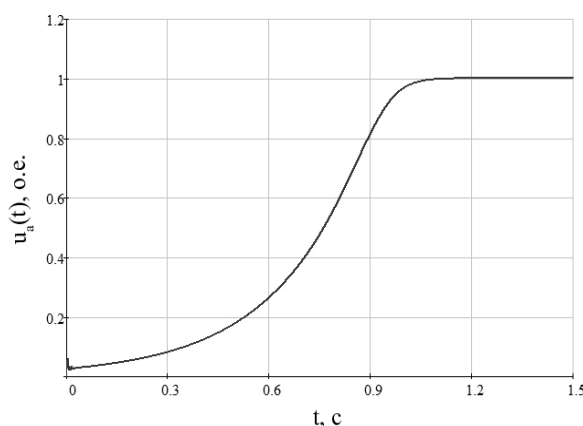


Рис. 3. Огибающая кривая действующего фазного напряжения статора при самовозбуждении асинхронного генератора (в о.е.), полученная при математическом моделировании

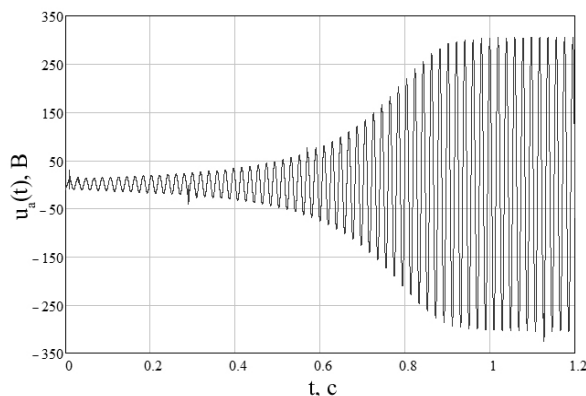


Рис. 4. Кривая фазного напряжения асинхронного генератора (в реальных единицах), полученная при физическом моделировании

Поскольку при моделировании использовались дифференциальные уравнения, справедливые для двигательного режима работы, то в дальнейшем предложенная система уравнений может использоваться для оценки процессов циркуляции энергии во внутренних контурах регулируемых асинхронных электроприводов, построенных по схеме «неуправляемый

выпрямитель – автономный инвертор – асинхронный двигатель» при переходе машины из двигательного в генераторный режим, а также для оценки их энергоэффективности.

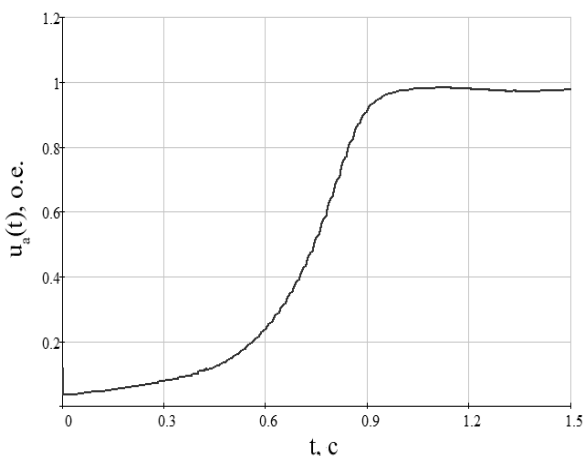


Рис. 5. Огибающая кривая действующего фазного напряжения асинхронного генератора (в о. е.), полученная при физическом моделировании

Заключение

Уточненная математическая модель самовозбуждения асинхронной машины, учитывающая нелинейность кривой намагничивания, дает результаты, с высокой степенью адекватности описывающие процесс самовозбуждения как в статических, так и в переходных режимах.

Андреев Александр Николаевич,

Вологодский государственный технический университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем,
e-mail: aancs@mail.ru

Несговорев Евгений Валерьянович,

Вологодский государственный технический университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем,
e-mail: e.nesg@mail.ru

Колесниченко Дмитрий Александрович,

Вологодский государственный технический университет,
аспирант кафедры управляющих и вычислительных систем,
e-mail: dimakolesnichenko@gmail.com

Предложенная модель может эффективно использоваться при расчетах и моделировании асинхронных генераторов и генераторных режимов асинхронных машин.

Список литературы

1. **Копылов И.П.** Электрические машины: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк.; Логос, 2000. – 607 с.
2. **Балагуров В.А.** Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
3. **Шрейнер Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург.: УРО РАН, 2000. – 654 с.
4. **Ковач К.П., Рац И.** Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / под ред. А.И. Вольдека. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

References

1. Kopylov, I.P. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola; Logos, 2000. 607 p.
2. Balagurov, V.A. *Proektirovanie spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Design of special electrical AC machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1982. 272 p.
3. Shreyner, R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives with solid state frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN, 2000. 654 p.
4. Kovach, K.P., Rats, I. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC electrical machines]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1963. 744 p.