



УДК 621.313.3

В. Н. Мещеряков, А. А. Муравьев
Липецкий государственный технический университет

Асинхронный генератор на базе машины двойного питания

Рассмотрен подход к реализации автономного генератора на базе асинхронного двигателя с фазным ротором с подключением цепи статора к нагрузке и питанием роторных обмоток от регулируемого источника переменного тока, а также определены границы устойчивой генерации электроэнергии.

Автономный генератор, асинхронный двигатель с фазным ротором, устойчивость, инвертор напряжения, оптимальный режим

Рост потребления электроэнергии определяет необходимость разработки эффективных альтернативных источников ее получения. Один из возобновляемых источников – энергия ветра. Для преобразования энергии в основном используют синхронный генератор, помимо него в такой установке необходимо использовать ступенчатый мультиплексор, выпрямитель, стабилизатор постоянного тока, инвертор. КПД такой установки напрямую зависит от количества и качества преобразования энергии из одного вида в другой.

В качестве альтернативы синхронному генератору предлагались и другие типы машин, в том числе и асинхронный генератор [1], [2]. Для эффективного применения асинхронной машины с фазным ротором в установках с переменной скоростью вращения необходимо создать систему управления возбуждением цепи ротора, которая будет учитывать изменение скорости вращения вала.

Преобразователи частоты и напряжения успешно используются не только для управления короткозамкнутыми асинхронными двигателями, но и для управления машиной двойного питания, в том числе выполненной на базе типовой асинхронной машины с фазным ротором, при ее работе как в двигательном, так и в тормозном режиме. Разработаны системы двухзонного управления двигателем двойного питания, в которых два согласованно работающих преобразователя частоты включены в цепь статора и ротора [3]–[5].

Высокое качество напряжения при переменной скорости вращения вала обеспечивается в установке на базе машины двойного питания,

работающей в генераторном режиме, при питании обмотки ротора от преобразователя частоты.

Современные преобразователи частоты, выполненные на базе инвертора тока с релейными регуляторами фазных напряжений, обеспечивают приближенную к синусоидальной форму выходного напряжения [6]–[8].

К основополагающим задачам, решаемым при построении системы, относится составление диаграммы энергетического баланса. Рассмотрим метод ее построения. Функциональная схема установки приведена на рис. 1, где управляемый источник энергии ИП подключен к цепи ротора асинхронной машины М, вал которой вращается со скоростью ω_p , и в цепь статора включена активная нагрузка R.

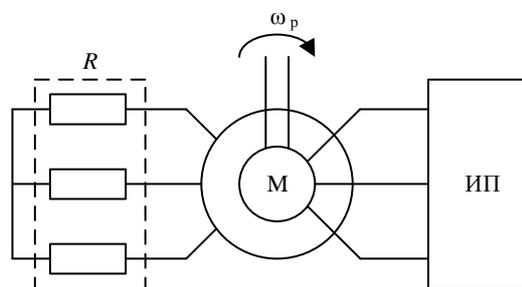


Рис. 1

Для начальной оценки целесообразности применения асинхронной машины воспользуемся диаграммой энергетического баланса генератора при условии его питания от идеальных источников и на активную нагрузку. Для этих целей была создана модель в пакете MatLab/Simulink.

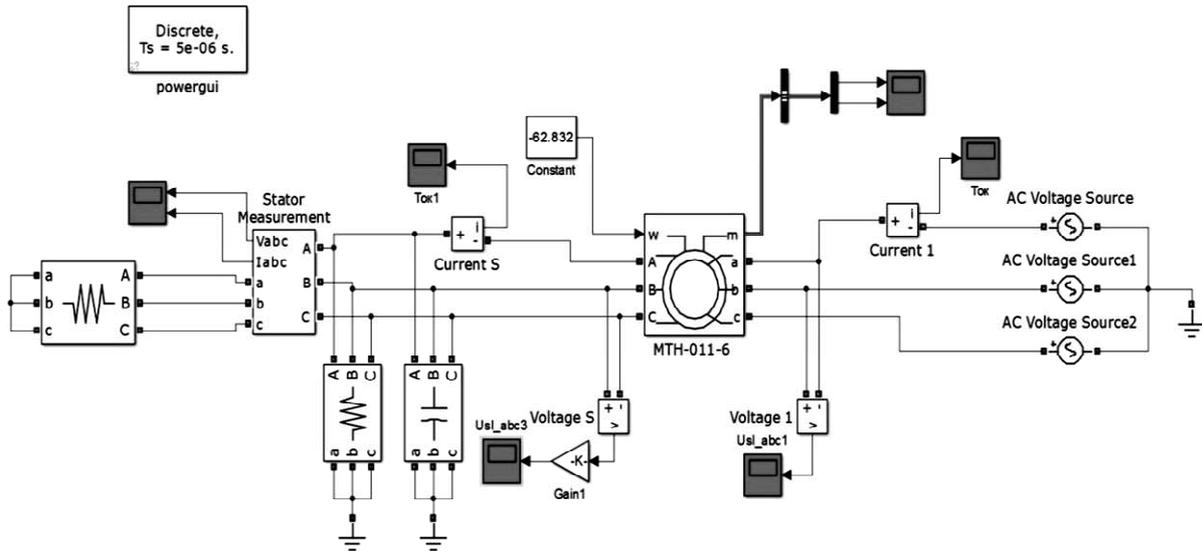


Рис. 2

При работе с переменной скоростью вращения вала следует учитывать текущую скорость и скорость холостого хода машины при заданной частоте напряжения на статоре. Рассмотрим случай, когда скорость вращения вала меньше скорости холостого хода при частоте 50 Гц. Необходимо, чтобы в цепи статора частота напряжения была постоянной и равной 50 Гц, поэтому в цепь ротора подается ток с частотой [9]

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_p, \tag{1}$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \cdot 50 = 314$ рад/с.

Модель, отражающая рассматриваемую функциональную схему, представлена на рис. 2.

В качестве исследуемой была выбрана асинхронная машина с фазным ротором МТН-011-6. В модели использованы источники переменного напряжения, с заданными параметрами.

Учитывались изменения скорости вращения вала и нагрузка при расчете значений параметров блоков источников напряжения роторной цепи.

В модели установки используется приведенная модель двигателя, поэтому для расчета амплитуды напряжения необходимо учитывать коэффициент приведения. Частота напряжения ротора рассчитывается с учетом скорости вращения по (1).

Для контроля сдвига фаз между токами и напряжениями в статорной цепи используется трехфазный измеритель, для работы которого необходим блок сопротивлений, который обеспечивает нулевой потенциал средней точки при соединении «звездой». При исследовании модели на скорости вращения вала генератора выше синхронной обеспечивалась смена чередования фаз переключением подводящих соединений к двигателю [10].

Зависимость напряжения ротора U_2 от скорости вращения вала снималась при условиях номинальной нагрузки, линейные напряжения на статоре – 380 и 200 В при частоте 50 Гц.

Постоянное значение напряжения поддерживалось коррекцией амплитуды и частоты напряжения ротора в зависимости от скорости вращения вала машины, а также нагрузки.

В ходе эксперимента, выполненного на испытательном стенде, были получены данные, приведенные на рис. 3. Опыт проводился при условии, что линейное напряжение статора равно 200 В. Данные условия были обусловлены возможностями стенда. Из полученных графиков видно, что зависимость между напряжением ротора и скоростью вала близка к линейной. Сравнительные результаты моделирования 1 и эксперимента 2 приведены на рис. 3. Они подтверждают адекватность модели.

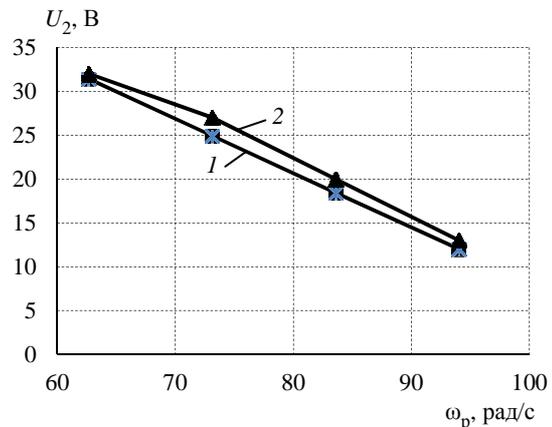


Рис. 3

Зависимость между требуемым напряжением ротора и скоростью вала, полученная в результате моделирования, представлена на рис. 4.

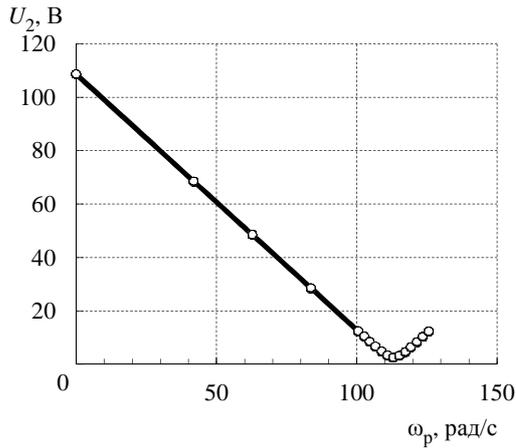


Рис. 4

Как видно из рисунка, получена нелинейная зависимость между напряжением ротора и скоростью вала в наиболее благоприятном для выработки электроэнергии диапазоне частот вращения ротора. По условиям эксперимента нагрузка была неизменной и напряжение статора поддерживалось на уровне 380 В, при этом ток ротора был постоянным. Ввиду постоянства тока ротора напряжение прямо пропорционально зависит от сопротивления цепи ротора Z_p , при этом активное сопротивление R_p не изменяется. Для поддержания частоты напряжения статора частота тока ротора f_p изменялась и, следовательно, изменялось индуктивное сопротивление L_p :

$$Z_p = \sqrt{R_p^2 + X_p^2}; \quad (2)$$

$$X_p = \omega_p L_p = 2\pi f_p L_p; \quad (3)$$

$$Z_p = \sqrt{R_p^2 + (2\pi f_p L_p)^2}. \quad (4)$$

Для подтверждения характера зависимости напряжения ротора от частоты вращения вала, используя (2)–(4), построим характеристику изменения сопротивления ротора при изменении скорости вращения (рис. 5).

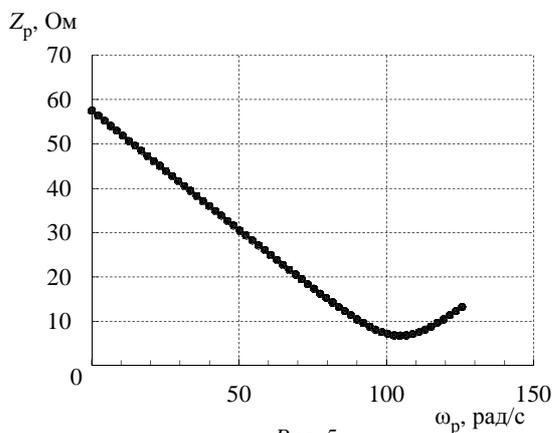


Рис. 5

Анализ зависимости напряжения ротора от скорости вращения вала показывает, что потребляемая мощность цепи ротора при низких скоростях значительно превышает значения при скорости вращения близкой к номинальной синхронной скорости, поэтому необходимо определить диапазон скорости вращения вала.

Для этого построим график выработки и потребления мощности (рис. 6) и проанализируем изменения мощностей статора P_1 (1), ротора P_2 (2), механическую энергию $P_{мех}$ (3) и потери $P_{пот}$ (4), используя формулы

$$P_1 + P_{пот} = P_{мех} + P_2; \quad (5)$$

$$P_{пот} = 3I_1^2 R_1 + 3(I_2')^2 R_2';$$

$$P_{мех} = M \omega_p;$$

$$P_1 = 3U_1 I_1;$$

$$P_2 = 3U_2 I_2';$$

где I_1 – ток статора; I_2' – приведенный ток ротора; R_1 – сопротивление статора; R_2' – приведенное сопротивление ротора; M – момент на валу; U_1 – напряжение статора; U_2 – напряжение ротора.

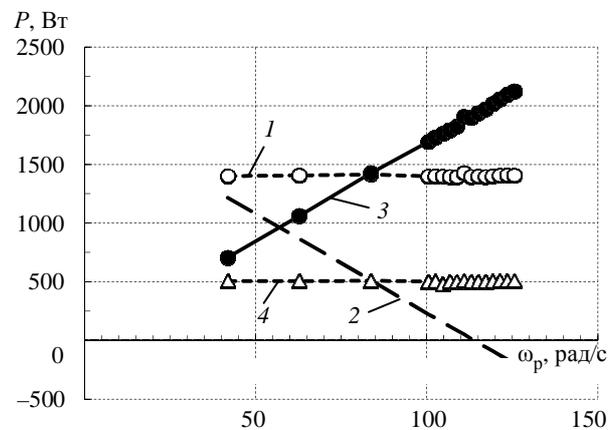


Рис. 6

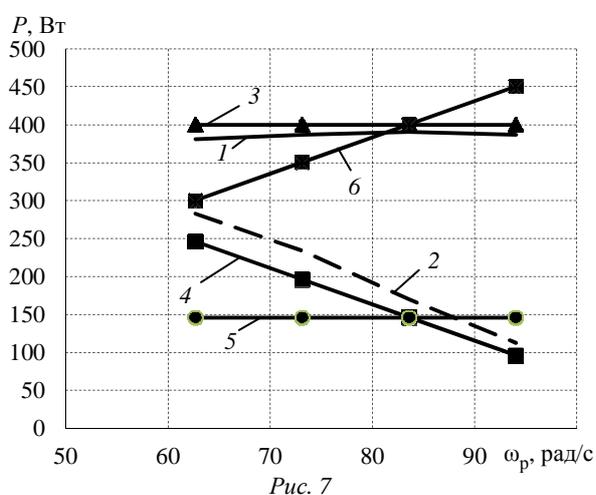
Из рис. 6 видно, что для выработки электроэнергии с наименьшими затратами скорость вала генератора должна быть не меньше 83 рад/с.

При этой скорости подаваемая механическая мощность полностью преобразуется в мощность, отдаваемую на статор, а потери компенсируются за счет энергии, подаваемой в цепь ротора. С увеличением скорости растет преобразуемая механическая энергия, что позволяет уменьшать мощность, передаваемую в цепь ротора. Причем при скоростях выше скорости холостого хода возбужденная машина начинает отдавать активную

мощность и по цепи ротора. Однако при этом по-прежнему продолжает потреблять реактивную мощность.

Для подтверждения полученных выводов был проведен эксперимент: были сняты зависимости мощностей ротора и статора от скорости вращения.

Эксперимент проводился при предельно достижимом на данной установке пониженном напряжении. Моделирование было проведено с таким же пониженным напряжением. Обобщенные результаты эксперимента (1 – P_1 , эксп.; 2 – P_2 , эксп.) и моделирования (3 – P_1 ; 4 – P_2 ; 5 – $P_{пот}$; 6 – $P_{мех}$) представлены на рис. 7.



Рассмотрим необходимость применения в статорной и роторной цепях конденсаторных батарей как источников реактивной мощности. Поскольку «генерируемая» конденсаторной батареей реактивная мощность пропорциональна $\omega_{0эл}C$, то для статорной цепи обосновано использование конденсаторной батареи, компенсирующей реактивное сопротивление холостого хода асинхронной машины $X_{х.х}$, при этом расчет сопротивления X_c и емкости C конденсаторной батареи был произведен следующим образом:

$$X_c = X_{х.х} = \frac{U_{1\phi}}{I_{с.х}} \sin \varphi_{х.х} = \frac{U_{1\phi}}{I_{с.х}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{х.х}} = \frac{220}{3.9} \sqrt{1 - 0.15^2} = 55.8 \text{ Ом}; \quad (6)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega_{0эл}C};$$

$$C = \frac{1}{\omega_{0эл}X_c} = \frac{1}{314 \cdot 55.8} = 57.1 \text{ мкФ},$$

где $\varphi_{х.х}$ – угол между током и напряжением; $U_{1\phi}$ – фазное напряжение статора; $I_{с.х}$ – ток холостого хода; $\omega_{0эл}$ – круговая электрическая частота тока.

По измеренным данным значение реактивной мощности, поступающей в роторную цепь, не велико даже при низкой скорости вращения вала генератора, когда частота подаваемого тока приближается к частоте 50 Гц, поэтому применение конденсаторной батареи в роторной цепи нецелесообразно.

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что диапазон скорости, при которой происходит генерирование мощности, лежит в области околосинхронных частот. При этом можно сделать вывод о необходимости источника питания ротора, работающего на низких частотах не более 30 Гц. Кроме того, при выборе типа источника питания предпочтение следует отдать преобразователю, выполненному на основе стандартного автономного инвертора напряжения, поскольку в сравнении с автономным инвертором тока он не использует для фильтрации выходных токов конденсаторных батарей, которые малоэффективны на низких частотах питающего напряжения. Емкость конденсатора звена постоянного тока можно значительно снизить, так как было выяснено, что в исследуемом режиме асинхронная машина практически не потребляет реактивной мощности по роторной цепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазалов А. А. Адаптивная ветроустановка переменного тока с асинхронным генератором // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2010. № 3 (104). С. 250–256.
2. Мазалов А. А. Адаптивная ветроустановка с машиной переменного тока двойного питания // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2012. № 1 (126). С. 26–33.
3. Мещеряков В. Н., Безденежных Д. В. Возможности машины двойного питания в отношении двух-

- зонного регулирования // Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. № 1. С. 26–29.
4. Мещеряков В. Н., Безденежных Д. В. Наблюдатель потокоцепления для машины двойного питания, управляемой по статорной и роторной цепям // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2010. № 11. С. 170–173.
5. Мещеряков В. Н., Байков Д. В. Имитационная модель асинхронного электропривода на базе мат-

ричного преобразователя частоты // Вестн. ЛГТУ. 2015. № 3 (25). С. 12–18.

6. Мещеряков В. Н., Абросимов А. Р. Системы управления асинхронным электроприводом на базе автономного инвертора тока // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2012. № 4. С. 53–57.

7. Пат. РФ 2456742, МПК H02P25/02, H02P27/04, H02P27/06. Способ управления электроприводом переменного тока / В. Н. Мещеряков, Д. В. Безденежных, А. М. Башлыков, А. С. Абросимов (Россия); заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет» (ГОУ ВПО ЛГТУ). Заявл. 14.04.11. Опубл. 20.07.12. Бюл. № 20. 9 с.

8. Meshcheryakov V. N., Voekov V. N. Developing a system of variable-frequency vector control based on a

self-commutated current inverter in an AP electric drive // Izv. vyssh. ucheb. zavedenij Chernozem'ja. 2015. № 1. P. 6–13.

9. Пат. РФ 2539347, МПК H02P9/44, H02P9/48. Способ управления автономным асинхронным двигателем / В. Н. Мещеряков, О. В. Мещерякова (Россия); заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ). Заявл. 26.07.13. Опубл. 20.01.15, Бюл. № 2. 7 с.

10. Разработка и исследование частотного асинхронного электропривода / В. Н. Мещеряков, А. А. Муравьев, А. М. Башлыков, О. В. Мещерякова // Тр. 16-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург, 2015. С. 175–178.

V. N. Meshcheryakov, A. A. Muravyev
Lipetsk State Technical University

AN INDUCTION GENERATOR BASED ON A DOUBLY-FED MAPHINE

There was analyzed the approach to implement a self-contained generator based on an induction motor with a wound rotor with connection of a stator circuit to the load and with power supply of a rotor windings from a regulated source of alternating current, and were also defined the boundaries of sustainable electricity generation.

The self-contained generator, the induction motor with a wound rotor, stability, voltage inverter, the optimal mode