

УДК 621.34.52

**В. Б. Клепиков**, д-р техн. наук,  
**А. Н. Моисеев, А. В. Семиков**

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ ПРИ НЕНАСЫЩЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

**Аннотация.** Составлены аналитические выражения, описывающие процесс самовозбуждения асинхронного генератора на линейном участке кривой намагничивания при активной линейной нагрузке. На экспериментальной установке, а также путем компьютерного моделирования проведена проверка достоверности полученных соотношений.

**В. Б. Клепиков**, д-р техн. наук,  
**О. М. Моїсєєв, О. В. Семіков**

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З САМОЗБУДЖЕННЯМ ПРИ НЕНАСИЧЕНОЇ МАГНІТНОЇ ЛАНЦЮГА

**Анотація.** Складені аналітичні вирази самозбудження асинхронного генератора, що описують процес, на лінійній ділянці кривої намагнічення при активному лінійному навантаженні. На експериментальній установці, а також шляхом комп'ютерного моделювання зроблена перевірка достовірності отриманих співвідношень.

**V. B. Klepikov**, ScD,  
**A. N. Moiseev, A. V. Semikov**

## STUDY MODE ASYNCHRONOUS GENERATOR A SELF-EXCITED WHEN AN UNSATURATED MAGNETIC CIRCUIT

**Abstract.** Analytical expressions describing induction generator self-excitation process were made on a linear part of magnetization curve at active linear loading. Quality Check of the correlations obtained was done on experimental model as well as by computer simulation.

В работах [3,4] обоснована целесообразность выполнения автономного источника электропитания для газораспределительных станций и газораспределительных пунктов, расположенных в удалении от электрических сетей, с использованием в качестве источника механической энергии турбодетандера по системе «Турбодетандер – Асинхронный генератор – Выпрямитель – Автономный инвертор напряжения, Широтно-импульсный преобразователь». Разработанный на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» Национального Технического Университета «Харьковский Политехнический Институт» источник с данной структурой был изготовлен по заказу ОАО «ТУРБОГАЗ». Одной из задач, которую пришлось решать при создании источника, была необходимость обеспечения надежного самовозбуждения генератора при отсутствии первичного источника электроэнергии.

В работе [2] отмечается: «физические процессы самовозбуждения асинхронного генератора можно отнести к недостаточно изученным».

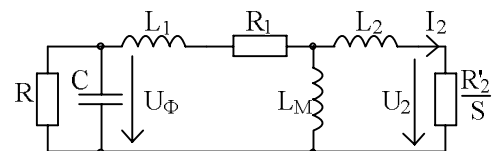
Целью настоящей работы является получение аналитических соотношений, которые были использованы при разработке вышеуказанного источника электропитания, а также их экспериментальная проверка.

Аналитические соотношения выводятся исходя из Т-образной схемы замещения асинхронного генератора [1,2].

При выводе соотношений параметры асинхронного генератора принимались постоянными, что соответствует

в работе асинхронной машины с ненасыщенным магнитопроводом. Схема замещения представлена на рис. 1.

Рис.1. Схема замещения асинхронной машины



Для данной схемы справедливы соотношения:

$$\vec{U}_2 = \vec{I}_2 \frac{R'_2}{S} \quad (1)$$

$$\vec{U}_2 = -\vec{I}_2 \left[ \frac{\left( \frac{R \cdot \frac{1}{j\Omega C} + j\Omega L_1 + R_1}{R + \frac{1}{j\Omega C}} \right) \cdot j\Omega L_M}{\frac{R \cdot \frac{1}{j\Omega C} + j\Omega L_1 + R_1 + j\Omega L_M}{R + \frac{1}{j\Omega C}}} + j\Omega L_2 \right], \quad (1')$$

где  $\Omega$  – угловая частота выходного напряжения асинхронного генератора,  $S=(\omega-\omega_p)/\omega$  – скольжение,  $\omega_p$  – скорость вращения ротора,  $\omega = \Omega/p$  – скорость вращающегося магнитного поля статора,  $p$  – число пар полюсов.

Активная мощность вращающегося электромагнитного поля

$$M\omega = 3I_2^2 \frac{R'_2}{S}, \quad (2)$$

где  $M$  – момент сопротивления, создаваемый асинхронным генератором.

Принимаем во внимание, что условием самовозбуждения генератора является равенство нулю суммы реактивной энергии конденсатора самовозбуждения и индуктивностей цепи. Последнее выполняется при равенстве нулю мнимой части вышеуказанного соотношения. Поэтому, приравнявая правые части 1и 1', получаем соотношение, из которого получим:

$$\begin{aligned} & C^2[\Omega^4(L_1 + L_M)(L_M L_1 + L_2 L_1 + L_2 L_M)R^2 + \\ & + \Omega^2(L_2 + L_M)R^2 R_1^2] - C\Omega^2(2L_1 L_M + 2L_2 L_1 + \\ & + 2L_2 L_M + L_M^2)R^2 + \Omega^2(2L_1 L_2 L_M + L_2 L_1^2 + \\ & + L_2 L_M^2 + L_M L_1^2 + L_1 L_M^2) + (L_M + L_2)(R + R_1)^2 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Из условия равенства вещественных частей, отображающего закон сохранения активной энергии, получаем

$$S = - \frac{R'_2[\Omega^4 C^2(L_1 + L_M)R^2 + \Omega^2((L_1 + L_M)^2 + \Omega^2 C^2 L_M^2 R^2 R_1 + \Omega^2 L_M^2 (R + R_1) + C^2 R^2 R_1^2 - 2C(L_1 + L_M)R^2) + (R + R_1)^2]}{\Omega^4 C^2 L_M^2 R^2 R_1 + \Omega^2 L_M^2 (R + R_1)} \quad (4)$$

Из последнего с учетом (2)

$$M = 3p \frac{U_\phi^2}{R} \frac{\Omega L_M^2}{\Omega^2 L_M^2 + R_1 \left( \frac{S}{R'_2} \Omega^2 (L_M + L_2)^2 + \frac{R'_2}{S} \right)} \quad (5)$$

Соотношение (3) свидетельствует, что для выбранной асинхронной машины при известной нагрузке емкость самовозбуждения фазы определяется только угловой частотой электрического тока статора. Графическая зависимость рассчитана для машины 4А100Л4У3 и приведена на рис.2. Анализ этой зависимости свидетельствует о снижении расчетной емкости самовозбуждения с ростом частоты.

Однако, хотя частота генератора благодаря наличию на его выходе выпрямителя не влияет на частоту автономного инвертора, значение  $\Omega$  исходя из практических соотношений следует принимать близким к 50 Гц, т. е. к номинальной частоте асинхронной машины.

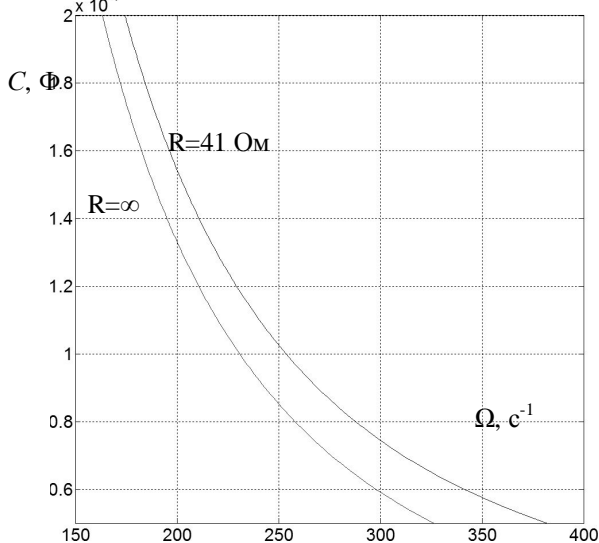


Рис.2. Зависимость емкости от частоты тока

Соотношение (4) показывает, что величина скольжения, а, следовательно, и скорость вращения ротора также определяются параметрами цепи и в пределах линейности рассматриваемой схемы не зависят от механической характеристики турбодетандера. Смещение механической характеристики турбодетандера вызовет изменение механической характеристики генератора, что обуславливается изменением напряжения статора. На рис.3 показано, как переход с механической характеристики турбодетандера 1 на характеристику 2 приведет к перемещению точки статического равновесия из А в В вследствие перехода асинхронного генератора с механической характеристики 1' на 2' в результате снижения напряжения на статоре асинхронного генератора, при этом скорость остается прежней.

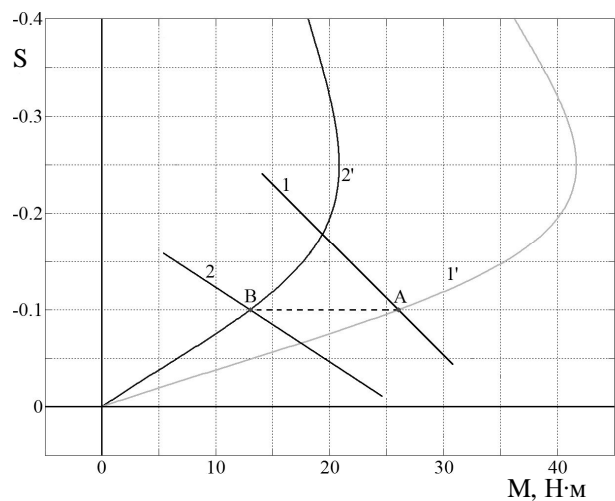


Рис.3. Перемещение рабочих точек при изменении характеристик турбодетандера

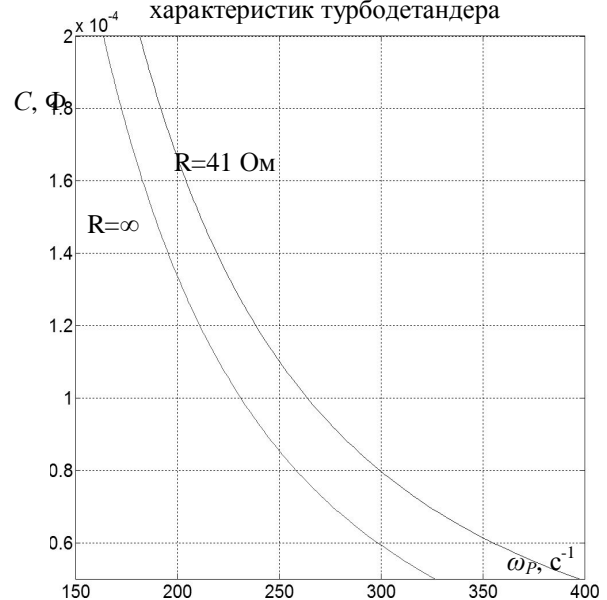


Рис.4. Зависимость емкости от скорости ротора

В соответствии с соотношением (5) изменение напряжения статора при изменении момента нагрузки может быть очень существенным (рис.5). Учитывая это обстоятельство, в структуру автономного источника был введен широтно-импульсный преобразова-

тель, работающий на активную нагрузку – нагревательные элементы (ТЭН). Такой подход позволил решить одновременно две задачи: во-первых, использовать недогрузку автономного инвертора для увеличения с помощью широтно-импульсного преобразователя энергии, потребляемой ТЕНами, с целью поддержания нагрузки асинхронного генератора на заданном уровне. Во-вторых, такой подход способствует решению существующей технологической задачи – подогреву транспортируемого к потребителям газа до температуры, определяемой техническими условиями.

Регулирование мощности, потребляемой нагревательными элементами (ТЭН), осуществляется широтно-импульсным преобразователем с использованием обратной связи по напряжению выпрямителя.

Компьютерное моделирование процессов самовозбуждения с использованием существующих моделей в пакете Simulink программы MATLAB при параметрах, рассчитанных по полученным зависимостям, подтвердило факт самовозбуждения асинхронного генератора, а также значение параметров установившихся режимов.

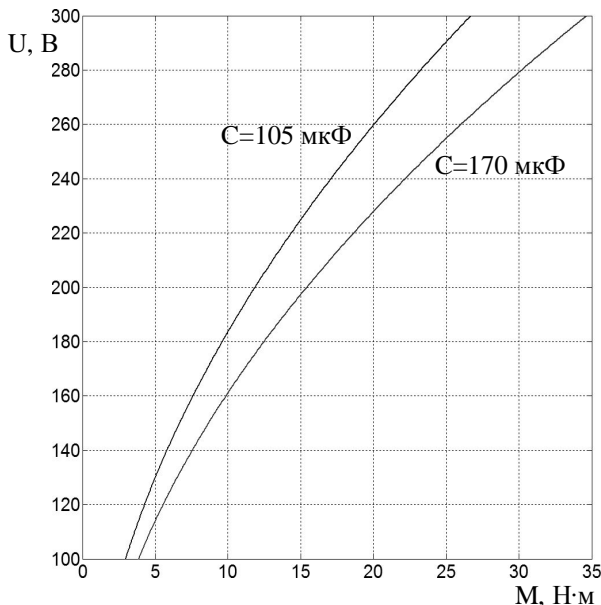


Рис.5. Зависимость напряжения асинхронного генератора от момента на валу при сопротивлении  $R = 41 \text{ Ом}$

Учитывая, что в реальных условиях асинхронная машина работает на участках кривой намагничивания, где проявляется насыщение магнитной цепи, возможность использования полученных соотношений была проверена экспериментально. Экспериментальная установка состояла из асинхронной машины мощностью 4кВт, приводимой в движение двигателем постоянного тока с независимым возбуждением, который питался от широтно-импульсного преобразователя, позволяющего изменять напряжение на двигателе. К обмоткам статора были подключены конденсаторы для самовозбуждения, а также активное сопротивление, имитирующее нагревательные элементы.

Эксперимент показал, что при токе намагничивания ниже значения тока намагничивания в номинальном режиме скорость ротора и частота тока при

изменении момента на валу генератора в пределах  $(0,1 \dots 0,5) M_H$  меняется в пределах до одного процента. При этом значения частоты и скорости отличается менее чем на десять процентов от рассчитанного значения.

Использование вышеприведенных соотношений, при проектировании автономного источника питания по системе «Турбодетандер–Асинхронный генератор – Выпрямитель–Автономный инвертор, Широтно-импульсный преобразователь» подтвердило их применимость для практических целей.

#### Список использованной литературы

- 1 Вольдек А.И., *Электрические машины* / А.И. Вольдек А.И. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
- 2 Кривцов В.С. *Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы* / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. Аэрокосм. ун-т. «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
- 3 Моисеев А.Н. К построению математической модели автономного источника электропитания для газотранспортных сетей по системе „турбодетандер-асинхронный генератор полупроводниковый преобразователь” / А.Н.Моисеев //Вестн. Нац. технич. ун-та „ХПИ”. Харьков: – 2008. – С. 387-389.
- 4 Синтез структуры источника электроэнергии для газотранспортной сети / В.Б.Клепиков, В.И.Колотило, А.Н. Моисеев, Е.Ф.Банев // Вісн. Кременчуц. держ. політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. – Вип. 4. – 2007. – Ч. 2. – С 29-30.

Получено 19.07.2011



Клепиков Владимир Борисович, д.т.н., проф. зав каф. «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ ХПИ, г. Харьков, ул. Фрунзе 21,



Моисеев Александр Николаевич, мл. науч. сотр. каф. «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ ХПИ, г. Харьков, ул. Фрунзе 21, тел. 707-60-41



Семиков Алексей Владимирович, студент каф. «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ ХПИ, г. Харьков, ул. Фрунзе 21, тел. 707-60-41