

МЕХАНИЗАЦИЯ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 621.313

С.А. КЕШУОВ, К. РАДЖЕШ, О. ОРДАТАЕВ

Казахский Национальный аграрный университет, инженерный факультет, г. Алматы

ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Аннотация

Сняты экспериментальные характеристики Автономного генератора с фазным ротором для определения параметров его регулирования.

Ключевые слова: Качество напряжения, автономный генератор, асинхронная машина с фазным ротором, регулирование напряжения, регулирование частоты.

Тірек сөздер: Кернеу сапасы, автономды генератор, фазалық роторлы асинхронды машина, кернеуді реттеу, жиілікті реттеу.

Keywords: Voltage quality, self-contained generator, induction machine with slip-ring motors, voltage regulation, frequency regulation.

Большая территория Республики Казахстан и низкая плотность населения приводят к тому, что энергетические потребности тысяч фермерских хозяйств, удаленных от централизованных источников электроснабжения, удовлетворить средствами большой энергетики экономически и технически нецелесообразно.

На Юге и Юго-Востоке Казахстана большое количество малых горных рек с необходимым запасом гидроресурсов позволяет достаточно экономно решать проблему электроснабжения малоомощных потребителей. Достоинством применения гидроэнергии, в сравнении с другими, является зачастую сравнительно небольшое изменение скорости течения воды в течение года, отсутствие периодов затишья. Выработка электроэнергии на микроГЭС имеет самую низкую себестоимость. При их установке исключается экологический ущерб.

Одним из важнейших органов микроГЭС является генератор. Современные микроГЭС, как правило, комплектуются синхронными генераторами. К их недостаткам следует отнести значительную стоимость, составляющую около половины общей стоимости микроГЭС, а также невозможность поддержания постоянной частоты и величины напряжения при изменяющихся оборотах гидротурбины. Последний недостаток отрицательно сказывается на работе электропривода минитехники достаточно широко внедряемой в фермерских хозяйствах, поскольку как показали испытания, проведенные в Казахском научно-исследовательском институте механизации и электрификации сельского хозяйства, частота напряжения синхронного генератора микроГЭС может меняться в пределах $-10\ldots+10\%$ от номинального значения.

МикроГЭС мощностью до 10 кВт выпускаются ОАО «Турбоатом» (Украина), «МНТО ИНСЭТ» (Россия), ООО «ГИДРОПОНИКА» (Киргизия), ТОО «КазНИИМЭСХ» (Казахстан), фирмами «Hydrolec» (Франция), «Bourne Energy river star» (США) и другими. В этих агрегатах в большинстве случаев используется синхронный генератор, в микроГЭС типа «Шар-Булак 1,7» и «Шар-Булак 5» (Киргизия) в качестве генераторов применяется асинхронная машина с короткозамкнутым ротором.

Идея использования асинхронного генератора с фазным ротором для автономных систем давно привлекает внимание исследователей [1- 4]. Опыт показывает, что это связано в первую очередь с низкой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации в нормальных режимах, стойкостью к внешним авариям, значительным ресурсом и главное управляемостью. Из ранее разработанных систем возбуждения асинхронных генераторов с фазным ротором можно отметить систему возбуждения со статическим инвертором [5], асинхронный вентильный генератор управляемый введением ЭДС в цепь фазного ротора с регулированием амплитуды и частоты выходного напряжения [6,7]. Но системы возбуждения, предлагаемые в данных работах, являются энергоёмкими и громоздкими.

Подавая на трехфазную обмотку ротора генератора, посредством современных микропроцессорных устройств, регулируемый по величине, частоте и чередованию фаз трехфазный ток, добиться регулирования ЭДС обмоток статора генератора, как по частоте вращения основного магнитного потока, так и по его величине, тем самым стабилизируя выходное напряжение генератора при переменной величине оборотов гидротурбины и нагрузки генератора.

Разрабатываемая система возбуждения должна соответствовать следующим условиям:

1) ток возбуждения должен создавать основной магнитный поток с заданной частотой вращения относительно обмотки статора, при переменной частоте вращения ротора;

2) величина тока возбуждения должна соответствовать необходимому значению магнитного потока при данной частоте вращения ротора и нагрузке генератора.

Уравнения токов в фазах обмотки ротора генератора при постоянной нагрузке, соответствующие графику линейного изменения скорости ротора и временной диаграмме токов в фазах обмотки ротора генератора, будут иметь следующий вид

$$i_a(t) = \begin{cases} I_m(\Delta\omega_r) \sin \left[\int_{t_1}^{t_2} \Delta\omega_{r1} \left(1 - \frac{t}{t_2}\right) dt \right] & \text{если } t_1 \leq t \leq t_2; \\ i_a(t_2) = \text{const} & \text{если } t_2 < t < t_3; \\ I_m(\Delta\omega_r) \sin \left[\int_{t_3}^{t_4} \left(\Delta\omega_{r4} \frac{t-t_3}{t_4-t_3}\right) dt \right] & \text{если } t_3 \leq t \leq t_4, \end{cases} \quad (1)$$

$$i_b(t) = \begin{cases} I_m(\Delta\omega_r) \sin \left[\int_{t_1}^{t_2} \Delta\omega_{r1} \left(1 - \frac{t}{t_2}\right) dt - \frac{2\pi}{3} \right] & \text{если } t_1 \leq t \leq t_2; \\ i_b(t_2) = \text{const} & \text{если } t_2 < t < t_3; \\ I_m(\Delta\omega_r) \sin \left[\int_{t_3}^{t_4} \left(\Delta\omega_{r4} \frac{t-t_3}{t_4-t_3}\right) dt - \frac{2\pi}{3} \right] & \text{если } t_3 \leq t \leq t_4, \end{cases} \quad (2)$$

$$i_c(t) = \begin{cases} I_m(\Delta\omega_r) \sin \left[\int_{t_1}^{t_2} \Delta\omega_{r1} \left(1 - \frac{t}{t_2}\right) dt + \frac{2\pi}{3} \right] & \text{если } t_1 \leq t \leq t_2; \\ i_c(t_2) = \text{const} & \text{если } t_2 < t < t_3; \\ I_m(\Delta\omega_r) \sin \left[\int_{t_3}^{t_4} \left(\Delta\omega_{r4} \frac{t-t_3}{t_4-t_3}\right) dt + \frac{2\pi}{3} \right] & \text{если } t_3 \leq t \leq t_4, \end{cases} \quad (3)$$

где $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ – мгновенные значения трехфазного тока возбуждения; $I_m(\Delta\omega_r)$ – амплитудное значение трехфазного тока возбуждения; $\Delta\omega_r = \omega_n - \omega_r$ – разность между номинальной и текущей скорости ротора; ω_n – номинальная скорость ротора; ω_r – текущая скорость ротора.

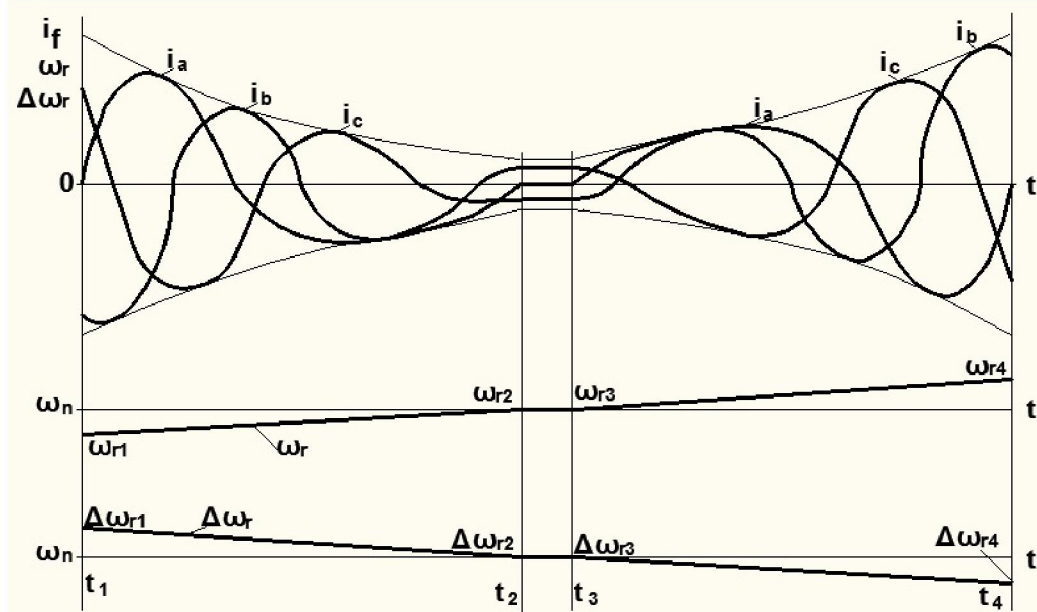


Рис. 1 - Временные диаграммы линейного изменения скорости ротора генератора при постоянной нагрузке и соответствующего трехфазного тока возбуждения генератора.

Для проведения предварительных опытов и снятия характеристик генератора, нами был собран лабораторный стенд, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис.2.

В качестве генератора была выбрана асинхронная микромашина с фазным ротором типа ЭМАМ4.

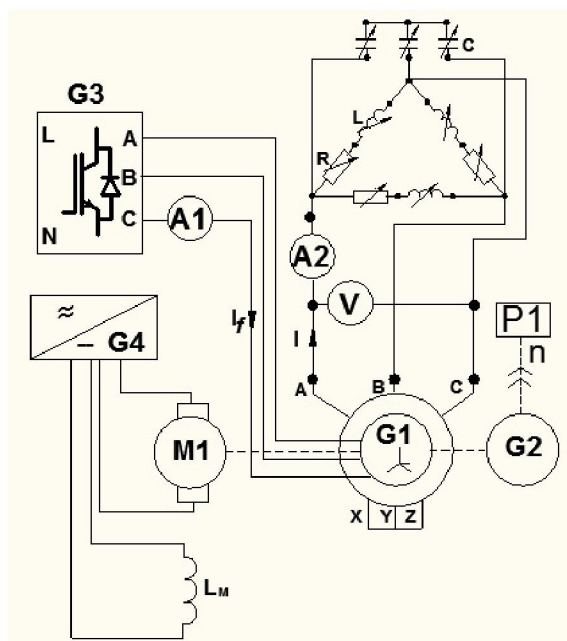


Рис. 2 – Принципиальная электрическая схема стенда.

G1 – генератор; G2 – преобразователь угловых перемещений; P1 – указатель частоты вращения электромашинного агрегата. G3 – микропроцессорная система регулирования возбуждения; G4 – источник питания двигателя постоянного тока; M1 – якорь двигателя постоянного тока с независимым возбуждением; L_m – обмотка возбуждения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением; R – активная нагрузка (220В/3×0...50Вт); L – индуктивная нагрузка (220В/3×0...40ВАр); C – ёмкостная нагрузка (220В/3×0...40ВАр); A – амперметр; V – вольтметр.

Для определения закономерностей регулирования тока возбуждения при изменениях нагрузки, при условии постоянства напряжения на выходе генератора равного номинальному используется регулировочная характеристика генератора $I_f = f(I)$ при $U = \text{const}$, $\omega_r = \text{const}$. Как показано на рис.3, при активной нагрузке (R , $\cos\varphi=1$), из-за поперечной реакции якоря имеющей размагничивающий характер, с увеличением тока нагрузки ток возбуждения следует повышать до 20...27% от номинального тока возбуждения для каждого из выбранных скоростей. При активно-индуктивной (RL) и индуктивной нагрузке (L), продольная реакция якоря имеет более сильный

размагничивающий характер и для компенсации величины ее магнитного потока следует повышать ток возбуждения в большей степени. Для ёмкостной нагрузки (C , $\cos\varphi < 1$, ток опережает по фазе ЭДС) продольная реакция якоря стремится увеличить магнитный поток и напряжение. Для сохранения напряжения стабильным, при ёмкостной нагрузке, необходимо с увеличением тока нагрузки уменьшать ток возбуждения до 13...18% от номинального для каждого из скоростей.

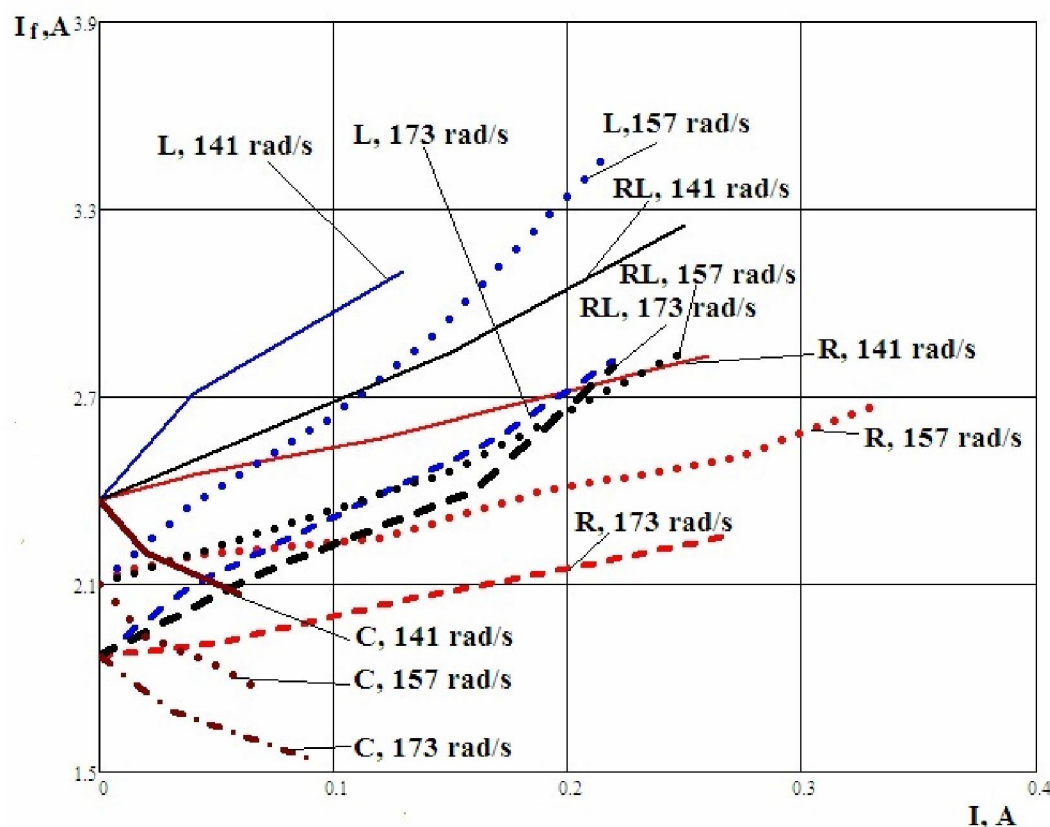


Рис.3- Регулировочная характеристика генератора $I_f = f(I)$ при $U = \text{const}$, $\omega_r = \text{const}$.

Практически интерес представляет регулировочная характеристика, снятая при различных скоростях ротора. При снятии этих характеристик, путем регулирования частоты и величины трехфазного тока возбуждения, выходное напряжение генератора поддерживалось постоянной по частоте f и величине U в диапазоне угловых скоростей ротора $\omega_r = 188,4 \dots 126,0$ рад/с, при номинальной скорости вращения $\omega_r = 157,0$ рад/с.

В ходе эксперимента выяснилось, что для указанного диапазона изменения скорости ротора, в режиме холостого хода ток возбуждения нужно регулировать нелинейно в пределах 0,10 – 0,65А, как при повышении скорости, так и при его понижении от синхронного значения (рис. 4).

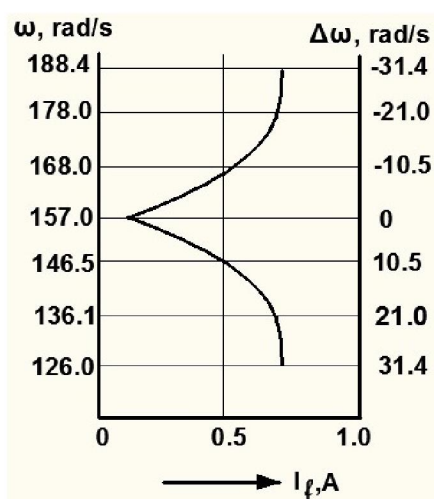


Рис.4 – Регулировочная характеристика генератора $I_f = f(I, \omega_r)$ при $f = \text{const}$, $U = \text{const}$, $I = 0$.

Примеры экспериментально снятой регулировочной характеристики генератора для активной, индуктивной и емкостной нагрузки $I_f = f(I, \omega_r)$ при $f = \text{const}$, $U = \text{const}$ показан на рис.5, здесь I_f – фазный ток возбуждения генератора. Для активной нагрузки (R) как показано на рис.5а переменный ток возбуждения нужно регулировать от 0,12 до 2А, в зависимости от тока нагрузки и скорости вращения ротора генератора. При

индуктивной нагрузке (L) ток возбуждения меняется от 0,15 до 2 А (рис.5b), а при ёмкостной нагрузке (C) от 0,3 до 1,7 А (рис.5c).

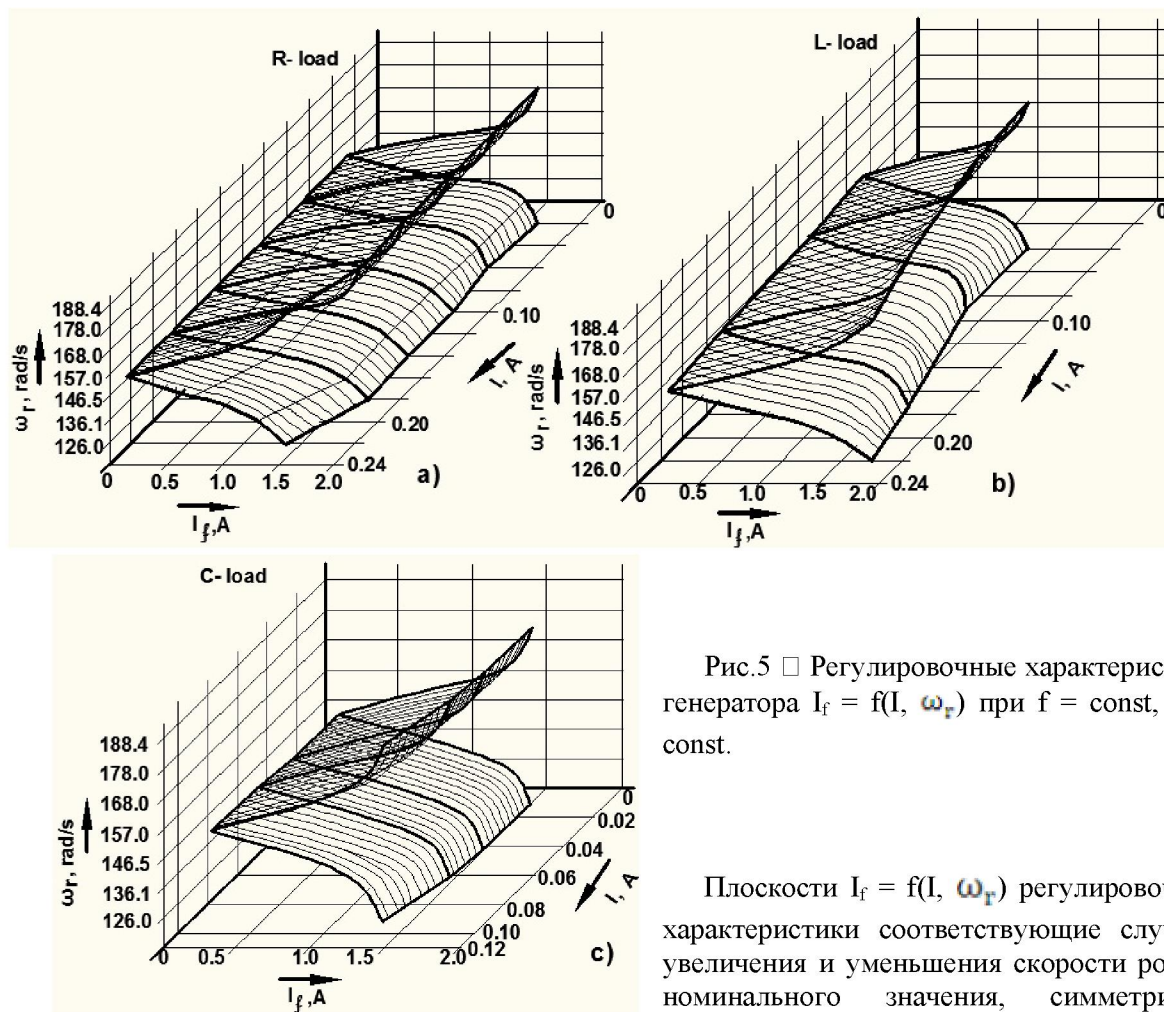


Рис.5 □ Регулировочные характеристики генератора $I_f = f(I, \omega_r)$ при $f = \text{const}$, $U = \text{const}$.

Плоскости $I_f = f(I, \omega_r)$ регулировочной характеристики соответствующие случаям увеличения и уменьшения скорости ротора номинального значения, симметричны относительно плоскости синхронной

от

скорости.

Также нами была поставлена задача экспериментального исследования характеристик холостого хода и короткого замыкания, и внешней характеристики при различных постоянных при снятии характеристики скоростях вращения ротора [8].

Характеристика холостого хода генератора представляет собой график зависимости напряжения на выходе генератора от тока возбуждения $U_0 = E_0 = f(I_0)$ при разомкнутой внешней цепи генератора $I = (0)$ и $\omega_r = \text{const}$. Испытания холостого хода произведены при установившемся тепловом состоянии генератора [9].

Результаты испытаний приведены на рис. 6. Анализ полученных данных показывает, что при номинальной скорости вращения ротора ток возбуждения пропорциональна индуктированной в статоре ЭДС до $I_0 = 1,5$ А. Постепенное отклонение характеристики холостого хода от линейного закона, при дальнейшем увеличении тока, связано с процессом насыщения магнитной цепи.

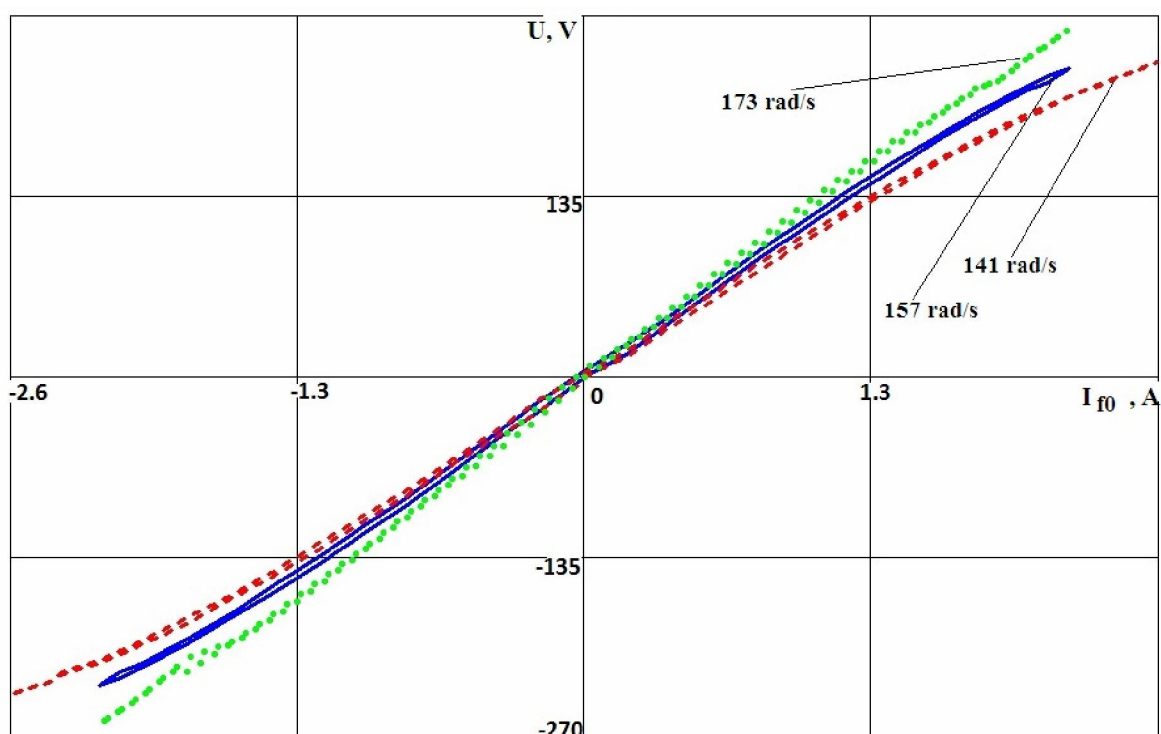


Рис.6 - Характеристики холостого хода генератора $U_0 = f(I_{f0})$ при $I = 0$, $\omega_r = \text{const}$.

В нашем случае для поддержания номинального напряжения $U_0 = 220\text{В}$ при холостом ходе и при различных оборотах ток возбуждения изменялся следующим образом: $I_{f0} = 2,1\text{А}$, при $\omega_r = 157\text{ рад/с}$; $I_{f0} = 2,37\text{А}$, при $\omega_r = 141\text{ рад/с}$; $I_{f0} = 1,87\text{А}$, при $\omega_r = 173\text{ рад/с}$. Как видим, при уменьшении скорости ротора генератора на 10% от номинального, ток возбуждения повышается на 12,9%, при увеличении на 10% снижается на 11%. В целом увеличение оборотов приводит к увеличению эдс обмоток генератора, при том же значении тока возбуждения во всем диапазоне его изменения. При снижении оборотов наблюдается обратная картина.

Одной из важных характеристик синхронного генератора является характеристика короткого замыкания – зависимость тока статора от тока возбуждения $I_k = f(I_{fk})$ при симметричном коротком замыкании на выводах статора при номинальной скорости вращения ротора $z_l = 0$ и $\omega_r = \text{const}$. Зависимость тока короткого замыкания в обмотке статора от тока возбуждения снимается при постепенном повышении тока возбуждения. Характеристика короткого замыкания имеет прямолинейный вид (рис. 7), это связано с тем, что активное сопротивление обмотки статора мало по сравнению с индуктивным. Ток отстает от ЭДС на 90° и является продольным током и реакция якоря становится размагничивающим, по этой причине магнитная цепь машины не насыщена.

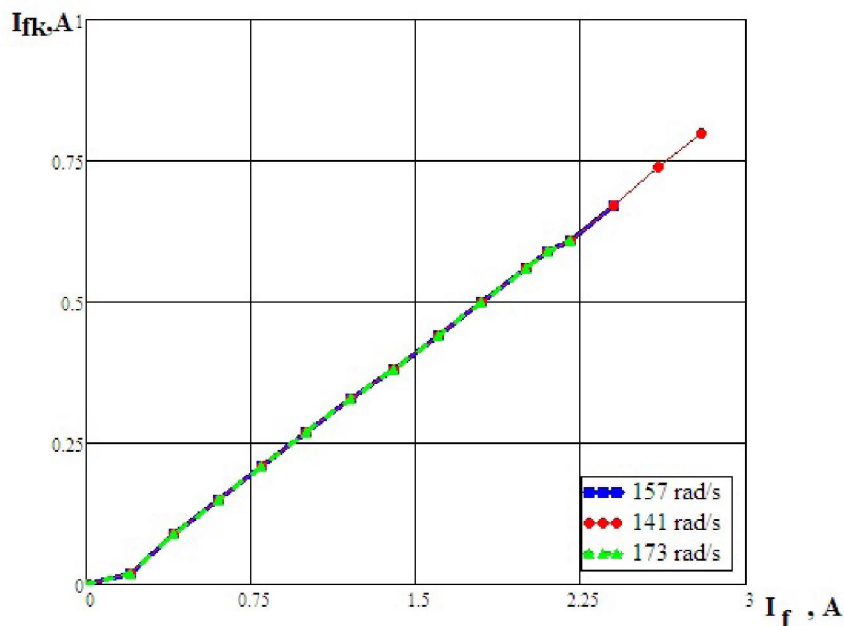


Рис. 7 - Характеристика короткого замыкания $I_k = f(I_{fk})$ при $z_l = 0$, $\omega_r = \text{const}$.

Характеристики короткого замыкания и холостого хода дают возможность определить значения токов возбуждения, соответствующих указанным составляющим мдс (магнитодвижущая сила) возбуждения.

Благодаря характеристике короткого замыкания определяем один из важных параметров электрических машин, отношение короткого замыкания (ОКЗ), которое представляет собой отношение тока возбуждения I_{f0} соответствующего номинальному напряжению при холостом ходе, к току возбуждения I_{fk} , соответствующему номинальному току статора при опыте короткого замыкания [10]

$$\text{ОКЗ} = I_{f0} / I_{fk}. \quad (4)$$

Ток возбуждения I_{f0} для каждого из выбранных скоростей $\omega_r = 141, 157$ и 173 rad/s, соответственно составил 2,37, 2,1 и 1,87А. Ток возбуждения I_{fk} при всех приведенных значениях скорости ротора оставался равным 0,8А. Тогда, значение ОКЗ соответственно будет равно 2,63, 2,3 и 2,1.

Таким образом, из характеристик холостого хода и короткого замыкания видно, что для каждого из скоростей отличных от номинального, изменение значения ОКЗ от значения соответствующего номинальной скорости не превышает 15%.

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения на выводах обмотки статора от тока нагрузки $U = f(I)$ при $I_f = \text{const}$, $\omega_r = \text{const}$. На рис. 8 представлены внешние характеристики, соответствующие различным по характеру нагрузкам генератора. Из рисунка видно, что при активной нагрузке (R) и увеличении тока статора до номинального значения, напряжение генератора уменьшается на 31...34% от номинального в зависимости от скорости вращения. При смешанной активно – индуктивной (RL) и индуктивной (L) нагрузке напряжение генератора уменьшатся в большей степени вследствие размагничивающего действия реакции якоря. Что касается чисто ёмкостной нагрузки (C), то при увеличений нагрузки, напряжение генератора увеличивается вследствие подмагничивающего действия якоря до 8...17% от номинального.

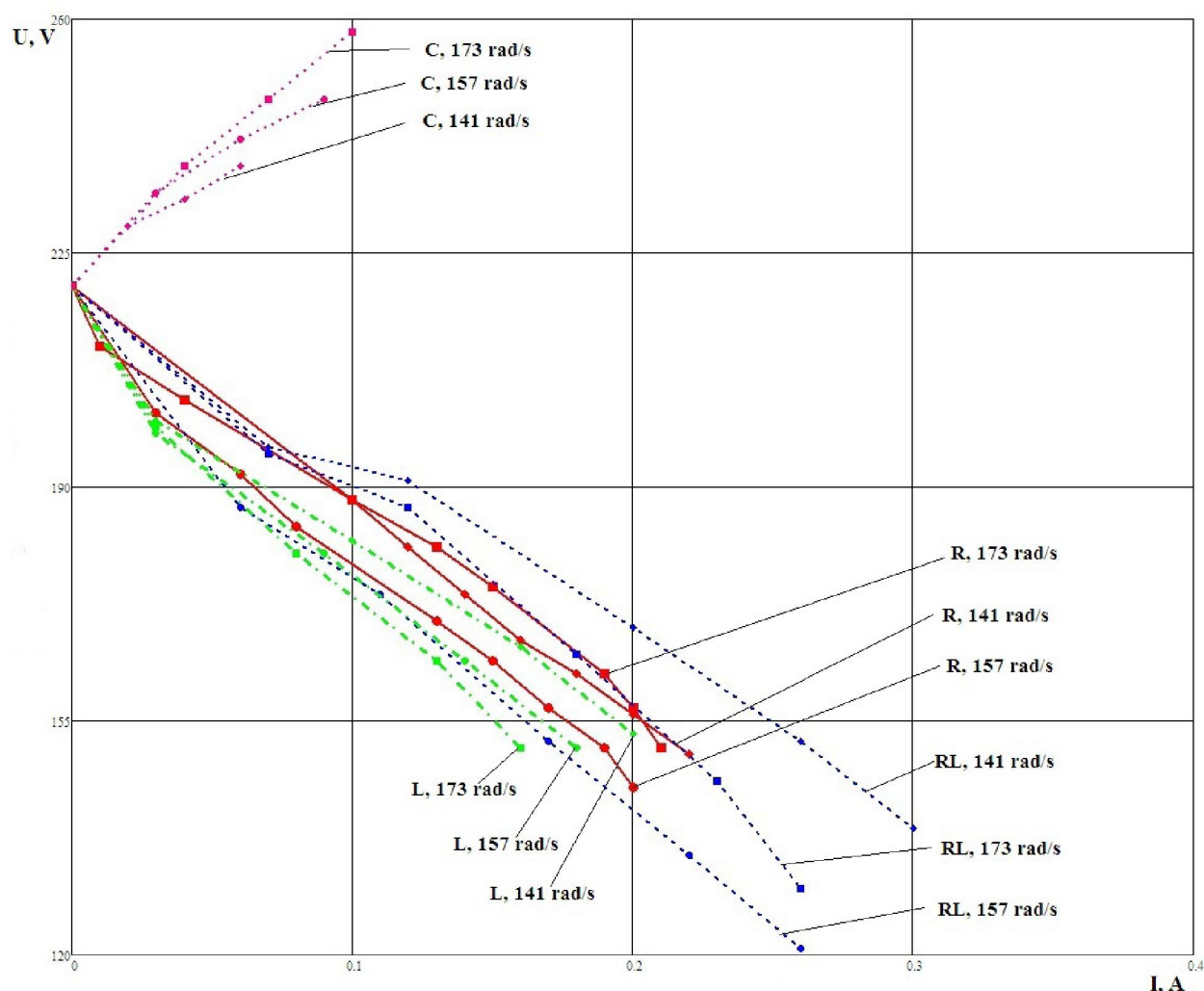


Рис. 8 - Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $I_f = \text{const}$, $\omega_r = \text{const}$.

В целом полученные в результате лабораторных экспериментов характеристики генератора позволяют определить необходимую величину тока возбуждения для различных скоростях вращения ротора, а так же при различных нагрузках.

Заключение

- составлены уравнения трехфазного тока возбуждения асинхронного генератора;
- экспериментально доказана возможность обеспечения постоянной частоты и действующего значения выходного напряжения генератора при переменных скорости ротора и нагрузки генератора;
- определены зависимости частоты и величины трехфазного тока возбуждения генератора при различных величине и видах нагрузки, а также скорости ротора;
- сняты характеристики холостого хода, короткого замыкания и внешняя характеристика асинхронного генератора.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Емец В.Ф., Петров Г.А. Перевод обкаточно-тормозных стендов с электрическими машинами 75,90 и 160 кВт в режиме электростанции/Повышение надежности электроустановок в сельском хозяйстве, Челябинск, 1987/
- 2 Чернопяттов Н.Н., Петров Г.А., Емец В.Ф., Частовский А.В. Использование асинхронных двигателей в качестве синхронных генераторов /Изв.вузов,серия: Энергетика,1983,№9/.
- 3 Емец В.Ф., Голубцова И.В. Расчет температуры нагрева обмотки ротора синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором /Вестник ЧГАУ, 2009, г. Челябинск №55/

- 4 Ордатаев О. Об использовании асинхронной машины с фазным ротором в качестве генератора микроГЭС. Международная конференция, IASHE, London, GB, 20.10.2011.
- 5 Лищенко А.И., Лесник В.А., Мазуренко Л.И., Фаренюк А.П. Системы возбуждения и автоматического регулирования напряжения автономного асинхронного генератора. Препринт -429 ИЭД АН УССР, Киев, 1985, 51с.
- 6 Костырев М.Л., Скороспешкин А.И., Дудышев В.Д. и др. А.с.568610(СССР). Способ управления автономным асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором. - Оpubл. в Б.И., 1978, № 2.
- 7 Костырев М.Л., Скороспешкин А.И., Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. – М.: Энергоатомиздат, 1993.- 160с.: ил.
- 8 Гольдберг О.Д. «Испытания электрических машин»-М.:Высшая школа, 2000,-255с.
- 9 Коварский Е.М. «Испытание электрических машин»-М.:Энергия, 1990.-380с.
- 10 Кислицин А.Л. «Синхронные машины»- Ульяновск, 2000.-109с.

Резюме: Сняты экспериментальные характеристики АГ с фазным ротором для определения параметров его регулирования.

Summary: Characteristics of the independent asynchronous generator for definition of parameters for regulation.

профессор Кешуов С.А., профессор Раджеш К., Ордатаев О.

Казахский Национальный аграрный университет, инженерный факультет, г. Алматы

ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ
CHARACTERISTICS OF SELF-GENERATORS POWERED BY INDUCTION MACHINES WITH WOUND ROTOR

АСИНХРОНДЫ ФАЗАЛЫ РОТОРЛЫ МАШИНА НЕПТЗІНДЕГІ АВТОНОМНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ
СИПАТТАМАСЫ

Автор: Кешуов С. А., ЖПС «ҚазақАППМЭФЗИ», Райымбек даңғылы 312

Данные автора: Кешуов С. А., ТОО «КазНИИМЭСХ», г.Алматы, пр.Райымбека 312

Author: Keshuov S.A., Kazakh RIMEA LLC, Almaty, Raiymbek ave. 312

Автор: Раджеш К., NDSU USA, Rajesh.Kavasseri@ndsu.edu

Данные автора: Раджеш К., NDSU USA

Author: : Rajesh Kavasseri, NDSU USA

Автор: Ордатаев О., инженерлік факультет, Қазақ ұлттық аграрлық университеті (ҚазҰАУ), Алматы, Абай 8, PhD докторанты

Данные автора: Ордатаев О., инженерного факультета при Казахском национальном аграрном университете (КазНАУ), Алматы, пр. Абай 8

Author: O. Ordatayev., Engineering dept., Kazakh national agrarian university, Almaty, (KazNAU), Abay ave. 8, PhD student

Поступила 01.10.2013 г.