

ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЕМКОСТНОГО ТОКА В СИСТЕМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Ченчевой В.В., аспирант, Рыков Г. Ю., ст. преподаватель.

Кременчугский государственный политехнический университет
имени Михаила Остроградского

39600, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20

E-mail: saue@polytech.poltava.ua

Введение. Автономные источники электроэнергии становятся все более популярными при решении вопросов электроснабжения потребителей различного назначения. Как следствие, автономные источники электроэнергии должны отвечать целому ряду требований: экономичность, надежность, большой срок службы, простота и удобство эксплуатации, малые масса и габариты. В связи с этим перспективной выглядит замена традиционно используемых в автономных электростанциях синхронных генераторов на асинхронные. Долгое время считалось, что использование асинхронного генератора в автономном режиме связано с большими сложностями, а потому не является целесообразным. Если проблема значительной массы и большой стоимости конденсаторов возбуждения в настоящее время решена, то вопрос создания простой и надежной системы стабилизации выходного напряжения асинхронного генератора остается открытым. Все известные на сегодняшний день способы регулирования напряжения асинхронного генератора имеют определенные недостатки, в результате, область применения таких генераторов ограничена. В соответствии с этим были сделаны выводы о критериях создания качественных регуляторов емкостной составляющей тока возбуждения:

- плавность регулирования тока возбуждения;
- широкий диапазон регулирования выходного напряжения;
- быстрое действие при регулировании тока возбуждения;
- качественный гармонический состав напряжения асинхронного генератора.

Многочисленные схемные решения регуляторов показывают на отсутствие качественного решения – универсальной схемы, обеспечивающей широкий диапазон регулирования выходного напряжения при изменении нагрузки. Поэтому создание рациональной системы управления емкостным током возбуждения является важной задачей при анализе вопроса создания систем автономного электроснабжения на базе асинхронного генератора. Решением данной проблемы являются системы с использованием релейного регулятора.

Системы с релейным регулятором емкостного тока работают с асинхронной машиной на протяжении всей кривой намагничивания, поэтому диапазон регулирования выходного напряжения значительно возрастает.

Целью работы является создание математического описания, адекватно отражающего процесс релейного регулирования напряжения в асинхронном генераторе.

Материал и результаты исследования. При работе асинхронной машины в качестве автономного генератора с конденсаторным самовозбуждением она включается не на сеть, а на нагрузку, которая в общем случае является активно-индуктивной $Z_H = R_H + jX_H$. Кроме того, в автономном режиме для создания изменяющегося во времени магнитного поля, необходима реактивная мощность, источником которой в самом простом случае является батарея конденсаторов с фазной емкостью C . Схема замещения автономного генератора с конденсаторным возбуждением представлена на рис. 1.

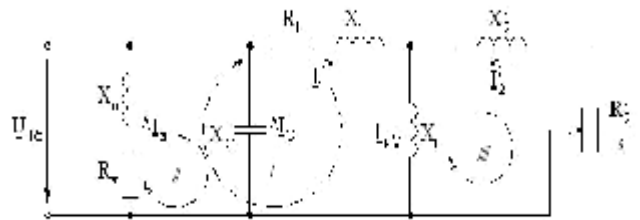


Рисунок 1 – Схема замещения автономного асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением

С целью получения сигнала выходного напряжения асинхронного генератора с релейным регулятором была создана математическая модель в трехфазной системе координат в пакете Matlab. При моделировании исследовался асинхронный двигатель 4АХБ2П100L4 с основной емкостью $C_0=10$ мкФ и емкостью регулятора $C_p=2,5$ мкФ, с паспортными данными: $P_{ном}=4$ кВт, $U_{ном}=220$ В, $p=2$, $I_{ном}=8,7$ А, $n_{ном}=1420$ об/мин, $\cos f_{ном}=0,81$, $h_{ном}=81\%$ и параметрами схемы замещения $R_1=1,35$ Ом, $R_2=1,39$ Ом,

$x_1=2,13 \text{ Ом}$, $x_2=2,3 \text{ Ом}$, $x_\mu=86 \text{ Ом}$. На выход генератора подключена активная нагрузка, $R_H = 1 \text{ кОм}$ и индуктивная $L_H = 0,001 \text{ Гн}$. Результаты моделирования представлены на рис. 2а.

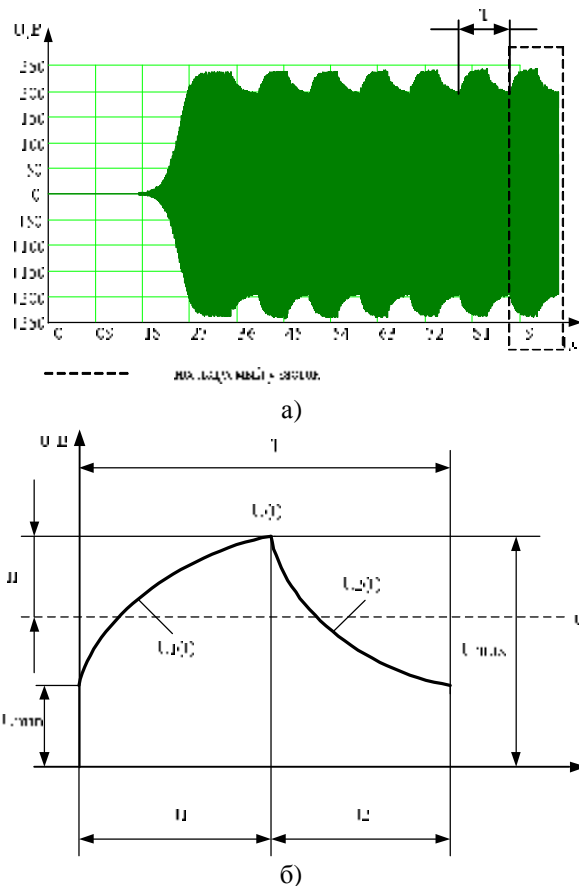


Рисунок 2 – Мгновенное значение напряжения а) и огибающая напряжения б) асинхронного генератора при релейном регулировании емкостного тока

Вид огибающей напряжения генератора при релейном управлении представлен на рис. 2,б.

Особенность выходного напряжения асинхронного генератора при релейном регулировании $u(t)$ в том, что на интервале времени t_1 частота напряжения питания w_{K1} (соответствующая подключенной основной емкости и емкости регулятора), а при t_2 - частота w_{K2} (подключена только основная емкость). Уменьшение амплитуды колебаний на интервале времени t_1 вызвано тем, что уменьшение емкости сопровождается увеличением сопротивления конденсаторов. При отключении емкости регулятора напряжение снижается вследствие внутреннего падения напряжения и снижения э.д.с. в результате увеличения частоты сети при $\omega_r=const$.

Как видно из рис. 1, именно благодаря индуктивной нагрузке переходной процесс становится практически аperiodическим, т.е.

приводит к аperiodической составляющей мгновенного значения напряжения [1].

Частоту тока статора f_1 определим, используя подход, сформулированный в [2]. Полученная на основе баланса активных и реактивных сопротивлений система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{R_2}{s} \left(R_1 + \frac{R_H}{R_H^2 w^2 C^2 + (w^2 CL_H - 1)^2} \right) - \\ - w^2 \left((L_2' + L_m) \left(L_1 + L_m - \frac{R_H^2 C + L_H (w^2 CL_H - 1)}{R_H^2 w^2 C^2 + (w^2 CL_H - 1)^2} \right) - L_m^2 \right) = 0 \\ \frac{R_2}{s} \left(L_1 + L_m - \frac{R_H^2 C + L_H (w^2 CL_H - 1)}{R_H^2 w^2 C^2 + (w^2 CL_H - 1)^2} \right) + \\ + (L_2' + L_m) \left(R_1 + \frac{R_H}{R_H^2 w^2 C^2 + (w^2 CL_H - 1)^2} \right) = 0 \end{cases}$$

позволяет найти циклическую частоту $\omega = 2\pi f_1$ (учитывая, что скорость вращения ротора при релейном регулировании поддерживается постоянной и равной скорости вращения магнитного поля машины $w_r = w_0 = const$, значение скольжения можно принять равным нулю $S \approx 0$):

$$w = \frac{\sqrt{C \cdot (L_1 + L_m) \cdot L_n \cdot (L_1 + L_m + L_n)}}{2 \cdot L_n \cdot C \cdot (L_1 + L_m)}$$

Откуда частоты напряжения ω_{K1} и ω_{K2} можно определить следующим образом:

$$w_{K1} = \frac{\sqrt{(C_0 + C_p) \cdot (L_1 + L_m) \cdot L_n \cdot (L_1 + L_m + L_n)}}{2 \cdot L_n \cdot (C_0 + C_p) \cdot (L_1 + L_m)}$$

$$w_{K2} = \frac{\sqrt{C_0 \cdot (L_1 + L_m) \cdot L_n \cdot (L_1 + L_m + L_n)}}{2 \cdot L_n \cdot C_0 \cdot (L_1 + L_m)}$$

где C_0 - основная емкость, C_p - емкость регулятора.

При значительных изменениях скорости вращения ротора частота напряжения равна:

$$w = \frac{w_r \cdot p \cdot (L_2 + L_m)}{(L_2 + L_m) - R_H \cdot R_2 \cdot C^2}$$

где p - число пар полюсов.

При этом нужно учитывать, что самовозбуждение асинхронного генератора возможно, если частота напряжения находится в диапазоне $w_{K.H.} \leq w \leq w_{K.B.}$, где $w_{K.H.} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_m) \cdot C}}$

- нижняя критическая частота самовозбуждения асинхронного генератора, $w_{K.B.} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2') \cdot C}}$ - верхняя критическая частота самовозбуждения асинхронного генератора.

Исходя из чего, скорость изменения напряжения пропорциональна разности проводимостей [3]:

$$\frac{dU}{dt} = R'_2 \cdot w_s \cdot (b_c - b_g),$$

где w_s - скорость вращения магнитного поля машины, $b_c = w_s \cdot C$ - проводимость конденсаторов

возбуждения, $b_g = \frac{1}{X_L}$ - индуктивная проводимость генератора.

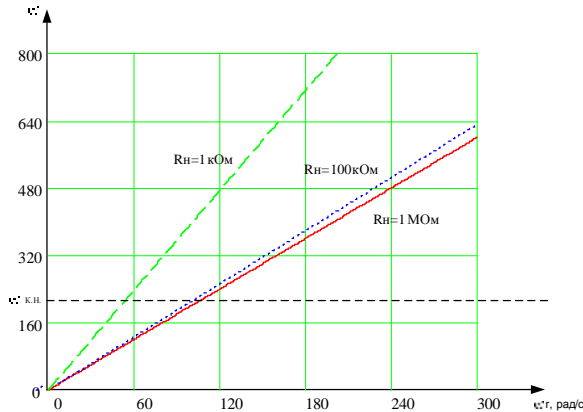


Рисунок 3 – График зависимости частоты напряжения от скорости вращения ротора и величины загрузки

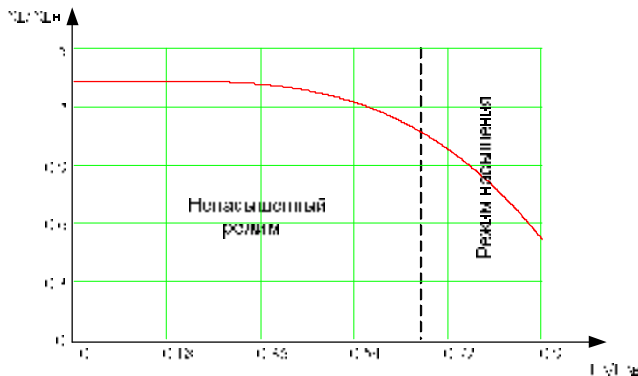


Рисунок 4 – Зависимость индуктивного сопротивления от напряжения статора

X_L можно определить из зависимости, рис. 4, которая может быть представлена выражением:

$$\frac{X_L}{X_{LH}} = -2 \left(\frac{U_s}{U_{SH}} \right)^3 + 0.926 \left(\frac{U_s}{U_{SH}} \right)^2 - 0.12 \left(\frac{U_s}{U_{SH}} \right) + 1.33,$$

где U_s - напряжение на зажимах статорной обмотки, X_L - индуктивное сопротивление генератора.

Особенностью системы релейного регулирования, отличающей ее от других систем управления возбуждением асинхронного генератора, является то, что она работает с асинхронным генератором на протяжении всей кривой намагничивания. Рассмотрим поведение автоколебаний напряжения при релейном

регулировании на ненасыщенном ($(0 - 0,8)U_{SH}$) и насыщенном ($(0,9 - 1,3)U_{SH}$) участках кривой намагничивания. На обоих участках индуктивная проводимость изменяется линейно:

$$\frac{b_g}{b_{gH}} = a \frac{U_{s \max}}{U_{s \max H}} + b,$$

где $U_{s \max}$ - амплитуда выходного напряжения асинхронного генератора, a и b - коэффициенты аппроксимации.

Исходя из этого, для асинхронного генератора передаточная функция по каналу "возбуждение - огибающая напряжения" может быть представлена в виде [3]:

$$W_G(p) = \frac{k}{T_g p + 1},$$

где $k = \frac{b_c - b \cdot b_{gH}}{b_c \cdot \left(a \cdot b_{gH} / U_{s \max H} \right)}$ - коэффициент

усиления асинхронного генератора,

$$T_g = \frac{1}{R'_2 \cdot w_s \cdot \left(a \cdot b_{gH} / U_{s \max H} \right)}$$
 - постоянная

времени возбуждения асинхронного генератора.

На интервалах времени t_1 и t_2 постоянные времени при различных значениях задающего напряжения соответственно равны:

1. На ненасыщенном участке ($U_3=150 В$):

$$T_g^{вкл} = \frac{1}{R'_2 \cdot w_{k1} \cdot \left(a \cdot b_{gH} / U_{s \max H} \right)} = 1.78 \text{ с},$$

$$T_g^{откл} = \frac{1}{R'_2 \cdot w_{k2} \cdot \left(a \cdot b_{gH} / U_{s \max H} \right)} = 1.71 \text{ с}.$$

2. На насыщенном участке ($U_3=220 В$):

$$T_g^{вкл} = \frac{1}{R'_2 \cdot w_{k1} \cdot \left(a \cdot b_{gH} / U_{s \max H} \right)} = 0.405 \text{ с};$$

$$T_g^{откл} = \frac{1}{R'_2 \cdot w_{k2} \cdot \left(a \cdot b_{gH} / U_{s \max H} \right)} = 0.371 \text{ с}.$$

Огибающая выходного напряжения асинхронного генератора при релейном регулировании на участках времени t_1 и t_2 будет изменяться по экспоненциальному закону:

$$U_1(t) = k_{(C_0 + C_p)} \cdot w_s \cdot (C_0 + C_p) + C_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_g^{вкл}}};$$

$$U_2(t) = k_{(C_0)} \cdot w_s \cdot C_0 + C_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_g^{откл}}},$$

где $C_1 = (U_3 - H) - k_{(C_0 + C_p)} \cdot w_s \cdot (C_0 + C_p)$ и

$$C_2 = \frac{(U_3 - H) - k_{(C_0 + C_p)} \cdot w_s \cdot (C_0 + C_p)}{(U_3 + H) - k_{(C_0 + C_p)} \cdot w_s \cdot (C_0 + C_p)} \times$$

$$\times ((U_3 + H) - k_{(C_0)} \cdot w_s \cdot C_0)$$

- постоянные интегрирования;

$$k_{(C_0 + C_p)} \text{ и } k_{(C_0)}, \quad T_g^{вкл} \text{ и } T_g^{откл} -$$

коэффициенты усиления и постоянные времени генератора при включенной и отключенной рабочей емкости.

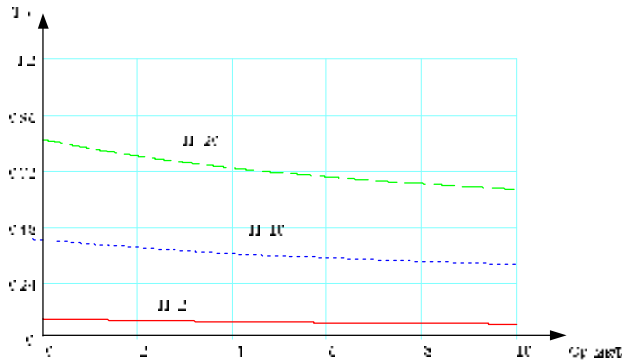


Рисунок 5 – Зависимость периода автоколебаний от величины рабочей емкости ($U_3=150$ В)

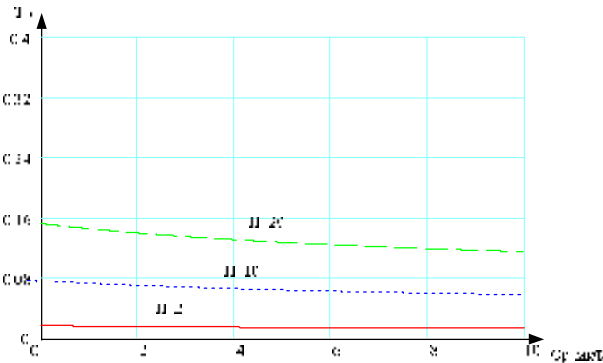


Рисунок 6 – Зависимость периода автоколебаний от величины рабочей емкости ($U_3=220$ В)

С учетом зоны гистерезиса интервалы времени t_1 и t_2 определяются следующим образом:

$$t_1 = \ln \left(\frac{(U_3 - H) - k_{(C_0 + C_p)} \cdot w_s \cdot (C_0 + C_p)}{(U_3 + H) - k_{(C_0 + C_p)} \cdot w_s \cdot (C_0 + C_p)} \right) \cdot T_g^{вкл};$$

$$t_2 = \ln \left(\frac{(U_3 + H) - k_{(C_0 + C_p)} \cdot w_s \cdot C_0}{(U_3 - H) - k_{(C_0 + C_p)} \cdot w_s \cdot C_0} \right) \cdot T_g^{откл},$$

где U_3 – напряжение задания, В;

H – ширина зоны гистерезиса, В.

Период установившихся колебаний:

$$T = t_1 + t_2.$$

Как видно из рис. 5 – 8, уменьшение ширины зоны гистерезиса, скорости вращения и увеличение величины рабочей емкости возбуждения асинхронного генератора приводит к уменьшению периода колебаний и увеличению числа переключений регулятора. Соответствующим образом изменяется характер переходного процесса при регулировании напряжения на насыщенном и ненасыщенном участках: на насыщенном участке период колебаний значительно меньше, чем на ненасыщенном, что обусловлено различными постоянными времени асинхронного генератора и его параметрами (индуктивной проводимостью, частотой напряжения).

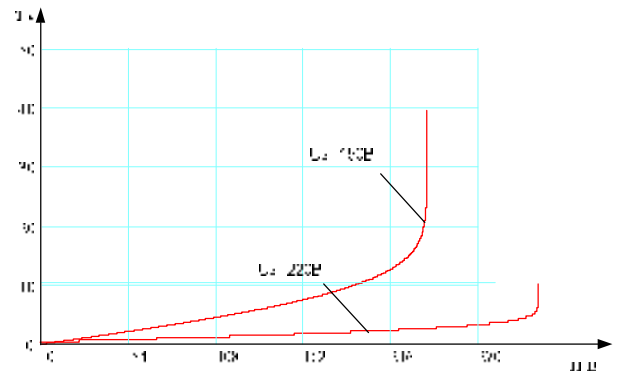


Рисунок 7 – Зависимость периода автоколебаний от величины зоны гистерезиса

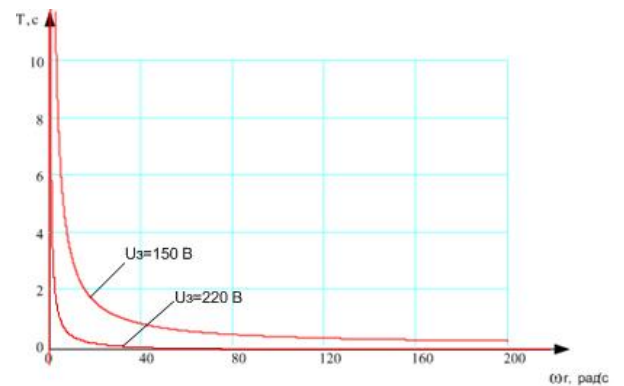


Рисунок 8 – Зависимость периода автоколебаний от скорости вращения ротора АГ

Выводы. Полученные выражения для постоянных времени и интервалов работы включенного и отключенного состояний релейного

элемента дополнительно позволяют определить важные параметры, характеризующие режим работы релейного регулятора: эффективное значение напряжения, его гармонический состав, колебания и отклонения напряжения на выходе генератора. В этом направлении следует вести исследования с целью получения необходимых качественных характеристик работы регулятора.

Рассмотренный математический аппарат позволяет реализовать устройство релейного регулирования выходного напряжения асинхронного генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневецкий Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами. - К.: Лыбидь, 1990. – 168 с.

2. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. - М: Высш. шк., 1982. – 272 с.

Вишневецкий Л.В., Муха Н.И. Постоянные времени асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением // Электромашинобудовання та електрообладнання. Вип. 53, 1999. – С. 74 - 75.