

УДК 621.313.332

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ЕМКОСТНЫМ САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Ю. В. Зачепа

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: zip1981@ukr.net

Приведен уточненный метод расчета статических характеристик асинхронного генератора при работе на динамическую активно-индуктивную нагрузку с учетом изменения частоты генерированного напряжения. Установлено, что неучет изменения частоты напряжения в функции нагрузки для генераторов малой мощности приводит к значительным неточностям при определении границ устойчивой работы. На основе экспериментальных исследований доказана адекватность предлагаемого метода.

Ключевые слова: автономный асинхронный генератор, конденсаторная батарея, двигательная нагрузка, внешняя характеристика.

АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ЄМНІСНИМ САМОЗБУДЖЕННЯМ

Ю. В. Зачепа

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: zip1981@ukr.net

Приведено уточнений метод розрахунку статичних характеристик асинхронного генератора під час роботи на динамічне активно-індуктивне навантаження з урахуванням зміни частоти генерованої напруги. Встановлено, що неврахування зміни частоти напруги у функції навантаження для генераторів малої потужності призводить до значних похибок при визначенні меж стійкої роботи. На основі експериментальних досліджень доведено адекватність запропонованого методу.

Ключові слова: автономний асинхронний генератор, конденсаторна батарея, двигунне навантаження, зовнішня характеристика.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современной тенденцией развития энергетики является стремление к сбалансированности энергорайонов, повышение надежности электроснабжения потребителей. Важное место в стратегии развития электроэнергетики занимают автономные системы электроснабжения (АСЭ). В последнее время АСЭ получают все более широкое распространение в системе электроснабжения не только специального, но и общего применения [1–3]. Указанные системы используются почти во всех областях народного хозяйства. Их самыми большими потребителями являются топливно-энергетический, агропромышленный и машиностроительный комплексы.

В указанных источниках электропитания преимущественно используются синхронные генераторы (СГ). Однако в последнее время наметилась тенденция использования в качестве преобразователя энергии асинхронных генераторов (АГ) или асинхронных двигателей (АД), работающих в генераторном режиме. Эти генераторы с короткозамкнутым ротором в конструктивном отношении значительно более просты и надежны по сравнению с СГ. В диапазоне мощностей 5...100 кВт масса АГ без системы емкостного возбуждения (ЕСВ) приблизительно в 1,3...1,4 раза меньшая, чем СГ такой же мощности. Бесконтактное исполнение, простота включения на параллельную работу и безопасность режима короткого замыкания – все эти преимущества делают проблему использования АГ в АСЭ перспективной.

Работу асинхронного генератора при изменяющихся величине выходного напряжения

и частоты, а также величине и характере нагрузки принято анализировать на основании статических характеристик. Однако все известные из литературы методы расчета статических характеристик АГ с конденсаторным возбуждением [4–9] имеют ряд допущений, последствия которых проявляются в основном при расчете характеристик генераторов малой мощности. В большинстве перечисленных методов расчета принято допущение, что скорость привода генератора меняется так, чтобы частота генерированного напряжения оставалась постоянной и равной синхронной частоте, независимо от характера и величины нагрузки. Это допущение приводит к тому, что характеристики рассчитываются для условий, отличающихся от действительных. Применяемые приводы имеют чаще всего стабилизированную скорость вращения. Управление этой скоростью в зависимости от величины и характера нагрузки для достижения постоянной частоты напряжения трудоемко и неэкономично. В некоторых работах, особенно для машин большой мощности, влиянием нагрузки на частоту генерированного напряжения просто пренебрегается, а такое упрощение, согласно исследованиям [10], допустимо для машин с номинальным скольжением порядка 0,03.

В случае применения в качестве генератора АМ с числом пар полюсов $p > 1$ и номинальным скольжением s_i порядка 0,05–0,06, что характерно для машин малой (до 5 кВт) мощности, неучет влияния нагрузки на частоту напряжения приводит к значительным ошибкам в расчете статических характеристик. Особенно указанные недостатки проявляются при динамическом характере нагрузки, например, при питании асинхронных двигателей, которые характеризуются наличием пусковых токов и переменным коэффициентом мощности.

В связи с этим целью работы является анализ статических режимов автономного асинхронного генератора малой мощности с учетом изменения частоты генерированного напряжения, обусловленной действием нагрузки.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для расчета рабочих характеристик системы АГ–ЕСВ–АД воспользуемся одной из общепринятых схем замещения соответствующих электрических машин (рис. 1), которая описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(R_{1n} + ajX_{1n})I_{1n} - ajX_m I_m - ajX_c I_c = 0; \\ (R_{2n} / s_d + ajX'_{2n})I_{2n} + ajX_m I_m = 0; \\ -(R_1 + ajX_1)I_1 - ajX_m I_m + ajX_c I_c = 0; \\ (R_2 / s_e + ajX'_2)I_2 + ajX_m I_m = 0; \\ I_1 - I_{1n} - I_c = 0; \\ -I_1 - I_2 + I_m = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где R_{1i} , R'_{2i} , R_m – активные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АД; X_{1i} , X'_{2i} , X_m – реактивные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АД; I_{1i} , I_{2i} , I_m – токи статорной, роторной цепей и контура намагничивания АД; I_c – ток ЕСВ; X_c – реактивное сопротивление ЕСВ; R_1 , R'_2 , R_m – активные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АГ; X_1 , X'_2 , X_m – реактивные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АГ; I_1 , I'_2 , I_m – токи статорной, роторной цепей и контура намагничивания АГ; $s_{\bar{a}}$, $s_{\bar{a}}$ – скольжения

АГ и АД; $a = f / f_i$ – относительная частота напряжения U_a .

При определении характеристик системы (1) в статических режимах работы неизвестными являются все реактивные сопротивления генератора и двигателя, а также частота генерируемого напряжения в цепи. Все остальные параметры принимаются постоянными, при этом скольжение асинхронного генератора представляется зависимостью от частоты $s_a = (1 - a) / a$.

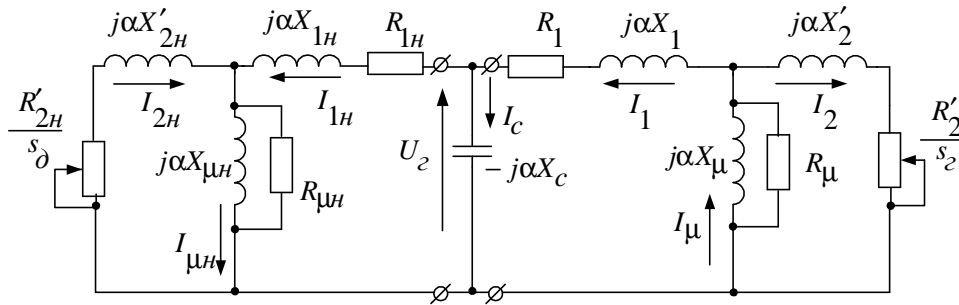


Рисунок 1 – Схема замещения системы АГ–ЕСВ–АД

Для определения недостающих параметров воспользуемся известным методом представления АД в статических режимах эквивалентной RL-цепью (рис. 2) с параметрами [11]

$$R_n = R_{1H} + \frac{X_m^2}{s_D (X_m + X'_{2H})^2 + R_{2H}^2}; \quad X_n = X_{1H} + \frac{X_m R'_{2H}}{R'_{2H}} - \frac{R_n s_D (X_m + X'_{2H})}{R'_{2H}} \quad (2)$$

и могут быть рассчитаны для любого значения скольжения двигателя s_a .

Таким образом, схему замещения можно представить в виде (рис. 2)

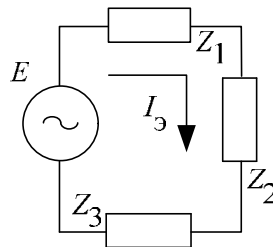


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения системы АГ–ЕСВ–АД

С учетом выполненных преобразований, на основе второго закона Кирхгофа получим:

$$I_3 Z_{\Sigma} = 0, \quad (3)$$

где $Z_S = Z_1 + Z_2 + Z_3$ – полное сопротивление цепи и определяется как $Z_1 = R_1 + jaX_1$ – полное сопротивление статорной цепи АГ; $Z_2 = R_1 + jaX_1 + Z_3 - jaX_c$ – полное сопротивление цепей нагрузки (АД) и емкостного возбуждения;

$Z_3 = \frac{-a^2 X'_2 X_m + a^3 X'_2 X_m + jaX'_2 R_m - ja^2 X'_2 R_m + ja^2 R'_2 X_m + aR'_2 R_m}{jaX'_2 - ja^2 X'_2 + aR'_2 + jaX_m - ja^2 X_m + R_m - aR_m}$ – полное сопротивление цепей

ротора и намагничивания АГ; $E = j \omega_0 = L_m I_m \omega_0$ – ЭДС генератора; I_y – приведенный ток цепи.

В нагрузочных режимах ток статорной цепи не может быть равным нулю $I_y \neq 0$, тогда для выполнения равенства (3) получим:

$$Z_S = Z_3 + Z_2 + Z_1 = \operatorname{Re}(Z_S) + j\operatorname{Im}(Z_S) = 0. \quad (4)$$

В результате несложных математических преобразований получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} (C_1 X_m^2 + C_2 X_m + C_3) a^4 + (C_4 X_m^2 + C_5 X_m + C_6) a^3 + (C_7 X_m^2 + C_8 X_m + C_9) a^2 + C_{10} a + C_{11} = 0; \\ (D_1 X_m^2 + D_2 X_m + D_3) a^5 + (D_4 X_m^2 + D_5 X_m + D_6) a^4 + (D_7 X_m^2 + D_8 X_m + D_9) a^3 + D_{10} a^2 + D_{11} a = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где коэффициенты $C_1 - C_{11}$ и $D_1 - D_{11}$ являются функциями параметров генератора, эквивалентных сопротивлений двигателя, емкостного возбуждения и скорости вращения.

Путем совместного решения уравнений системы (5) могут быть получены значения реактивного сопротивления контура намагничивания X_m асинхронного генератора и относительная частота генерируемого напряжения a , согласно которым может быть рассчитано значение напряжения генератора. Более детально алгоритм расчета приведен в [12].

На основе разработанного метода для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общепромышленного исполнения типа АИР80А4СУ2: $P_i = 1,2$ кВт; $n_i = 2740$ об/мин; $I_i = 2,93$ А; $R_1 = 9,37$ Ом; $R_2 = 5,13$ Ом; $X_1 = 7,03$ Ом; $X_2 = 6,5$ Ом, работающего в генераторном режиме с емкостным возбуждением $C = 30$ мкФ, были рассчитаны характеристики при работе на активную и активно-индуктивную нагрузки. На рис. 3 кривая 1 – внешняя характеристика АГ, рассчитанная по предлагаемому методу, кривая 2 – характеристика генератора без учета изменения частоты питающего напряжения. Из приведенных характеристик следует, что в случае АГ малой мощности неучет вызванного нагрузкой изменения частоты приводит к значительным погрешностям при анализе его нагрузочных возможностей и, в результате, к неточной информации относительно характеристик емкостной системы возбуждения, а именно – емкости и количества ступеней регулировочных конденсаторов.

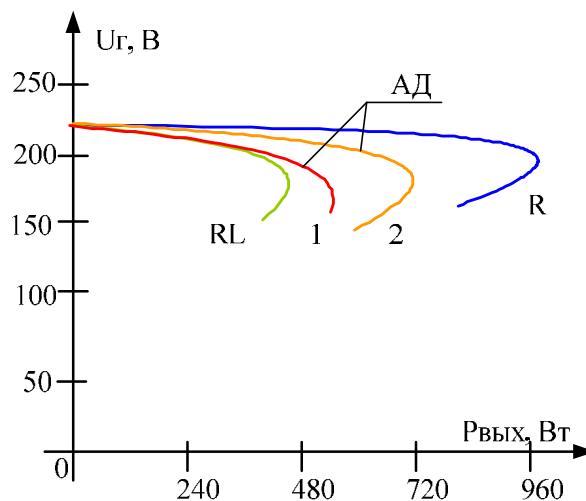


Рисунок 3 – Зависимость напряжения генератора от выходной мощности

Приведенный метод расчета статических характеристик системы АГ–нагрузка использовался для оценки свойств асинхронного генератора, построенного на базе типового двигателя с короткозамкнутым ротором типа АИР80А4СУ2 с номинальной мощностью

1,2 кВт и анализа влияния параметров емкостной системы возбуждения на эти характеристики. Результаты расчетов приведены на рис. 4, 5.

Как следует из характеристик рис. 4, при увеличении расчетного значения начальной емкости возбуждения ($C_{\text{дв}} = 27$ мкФ) возрастает перегрузочная способность и увеличивается жесткость механических характеристик АГ. Так, при емкости возбуждения $\tilde{N} = 30$ мкФ перегрузочная способность генератора составляет 0,375, а, согласно требованиям [13], при допущении 10 % снижения напряжения перегрузочная способность генератора составляет всего 0,3 при активной нагрузке ($\cos j = 1$). Нагрузочные способности генератора уменьшаются еще более при работе на потребителей с активно-индуктивным характером. Как следует из рис. 4, при емкости $\tilde{N} = 30$ мкФ перегрузочная способность с учетом требования по качеству электроэнергии составляет всего 0,15 ($\cos j = 0,9$). Увеличение начальной емкости возбуждения до 50 мкФ приводит к перенасыщению магнитной системы генератора, но при этом перегрузочная способность увеличивается до 0,6 для активной и 0,37 для активно-индуктивной нагрузок.

Влияние изменения характера нагрузки на внешние характеристики приведено на рис. 5. Как видно из рисунка, уменьшение коэффициента мощности активно-индуктивной нагрузки приводит к значительному уменьшению перегрузочной способности асинхронного генератора. Кроме того, в значительной степени уменьшается и жесткость механических характеристик. Так, для представленного генератора уменьшение коэффициента мощности активно-индуктивной нагрузки с $\cos j = 1$ до $\cos j = 0,8$ даже при практически в два раза увеличенной начальной емкости возбуждения ($\tilde{N} = 50$ мкФ), приводит к снижению перегрузочной способности более чем в три раза. Этот факт практически исключает применение АГ для электроснабжения активно-индуктивных потребителей без систем стабилизации напряжения.

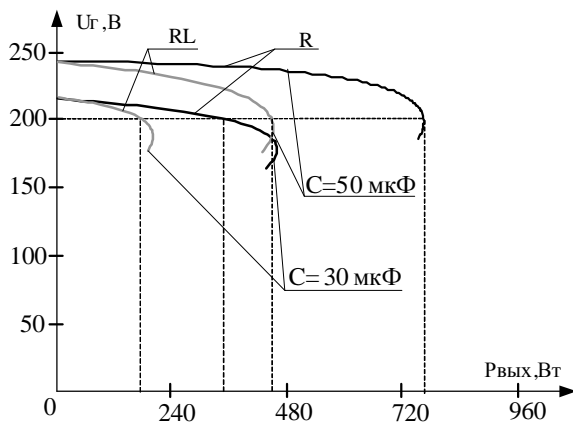


Рисунок 4 – Зависимость напряжения генератора от мощности нагрузки при емкости возбуждения 30 и 50 мкФ

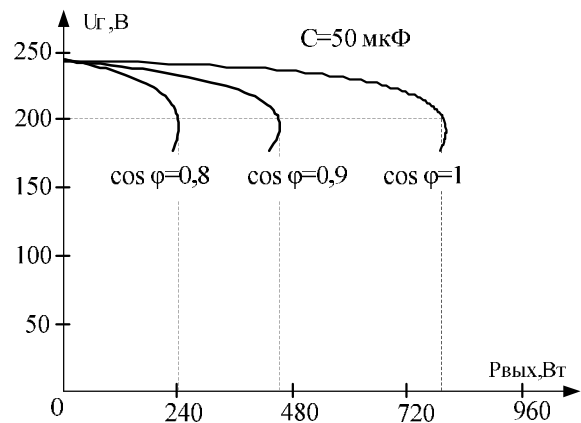


Рисунок 5 – Внешние характеристики генератора при изменяющемся коэффициенте мощности нагрузки

Проверка адекватности предлагаемого метода по расчету статических характеристик системы АГ–ЕСВ–нагрузка осуществлялась на экспериментальном лабораторном стенде, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 6.

Основной частью установки является асинхронная машина и приводной двигатель, установленные на раме. В качестве генератора использовался трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа АИР80А4СУ2, номинальные параметры которого приведены выше. В качестве приводного двигателя использовался двигатель

постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением. Изменение скорости вращения ротора АГ и мощности ДПТ осуществлялось за счет изменения напряжения на якоре последнего посредством тиристорного преобразователя. Суммарная емкость конденсаторов возбуждения в каждой из фаз формировалась за счет параллельного включения всех или нескольких конденсаторов с помощью выключателей К2, АВ3–АВ6. Таким образом, при проведении исследования имелась возможность регулирования скорости вращения ротора АГ, изменения параметров и схемы включения (звездой или треугольником) емкостной системы возбуждения КБ и мощность приводного двигателя ДПТ.

В установке предусмотрено подключение к АГ симметричной нагрузки различного характера:

- трехфазной нагрузки с активным характером – осветительные приборы, включение/отключение которых осуществляется с помощью пакетного переключателя SA1 «положение 1»;
- трехфазной нагрузки в виде двух асинхронных двигателей различной мощности с различными моментами нагрузки на валу, подключение которых осуществляется с помощью пакетного переключателя SA1 «положение 2» и автомата К4 соответственно;
- активной нагрузки R1, подключаемой через выпрямитель (VD5–VD11, собранный по схеме Ларионова) и ключ К5.

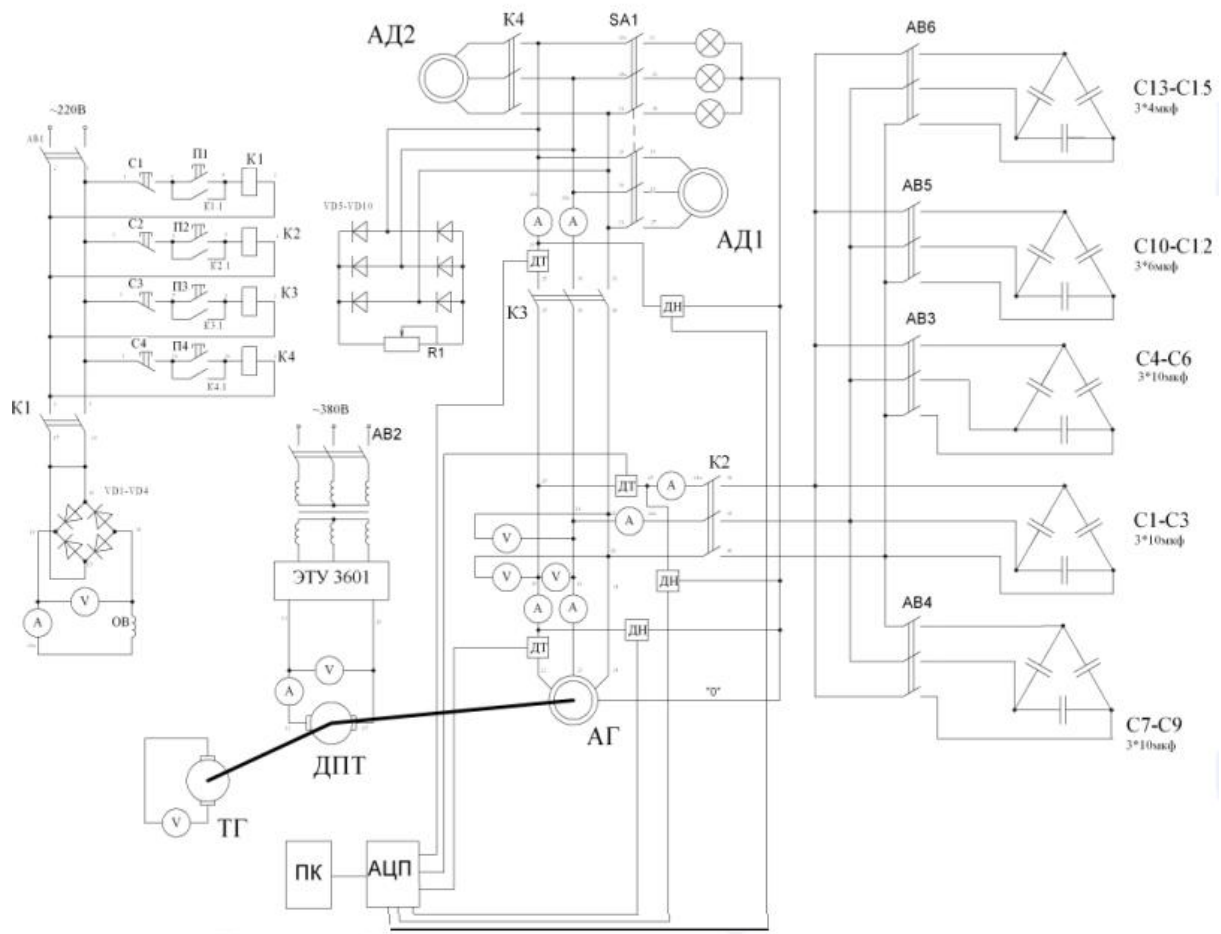


Рисунок 6 – Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 7–11. Для

наглядности все значения исследуемых параметров приводятся в относительных единицах (по отношению к номинальным значениям). За номинальные величины приняты номинальная скорость вращения АД, работающего в генераторном режиме, линейное напряжение (U_{1H}) и фазный ток (I_{1H}) при соединении его обмоток статора звездой, а за номинальное сопротивление – полное сопротивление (Z_H) при номинальных параметрах АД $R_{oe} = r_H / Z_H$.

На рис. 7–8 представлены зависимости линейного напряжения, тока нагрузки, тока фазы и скорости вращения ротора АГ от величины активного сопротивления нагрузки. Кривые 1–4 получены при различных начальных линейных напряжениях холостого хода (U_{10}), равных, соответственно, 360, 300, 220 и 180 В. Очевиден одинаковый характер изменения кривых 1–4. При уменьшении сопротивления нагрузки напряжение нелинейно уменьшается. В диапазоне нагрузок от $8 Z_H$ до $2,5 Z_H$ напряжение на зажимах АГ независимо от начального значения U_{10} уменьшается примерно на одну и ту же величину $\Delta U = 0,15 U_{1H}$.

Анализ характеристик (рис. 8) показал, что с уменьшением омического сопротивления ток нагрузки (I_{1H}) нелинейно возрастает до критического (максимального) значения, а затем резко падает. После того, как величина сопротивления становится меньше критического значения, наступает режим «опрокидывания», при котором ток нагрузки и линейное напряжение резко уменьшаются, т.е. происходит срыв возбуждения АГ.

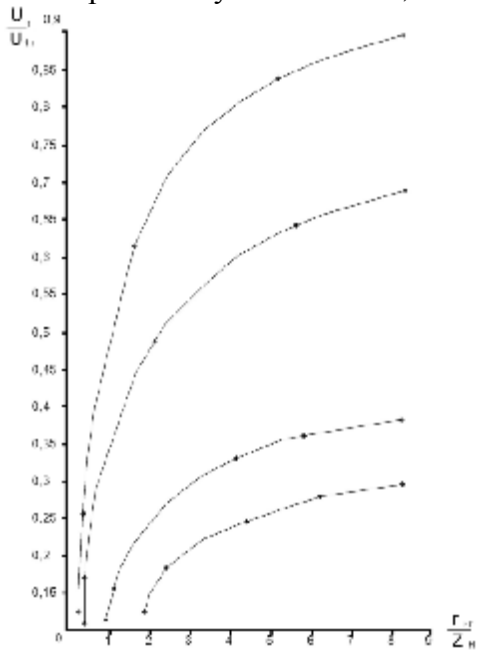


Рисунок 7 – Зависимость линейного напряжения АГ от величины активного сопротивления нагрузки

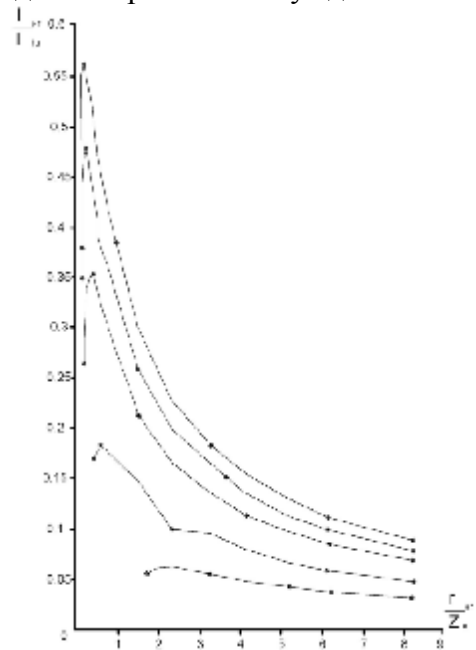


Рисунок 8 – Зависимость тока нагрузки АГ от величины активного сопротивления нагрузки

Для наглядности экспериментальные и расчетные кривые асинхронного генератора в нагрузочных режимах сведены на рис. 9–10. Экспериментальные характеристики показаны сплошными линиями, а расчетные – пунктирными.

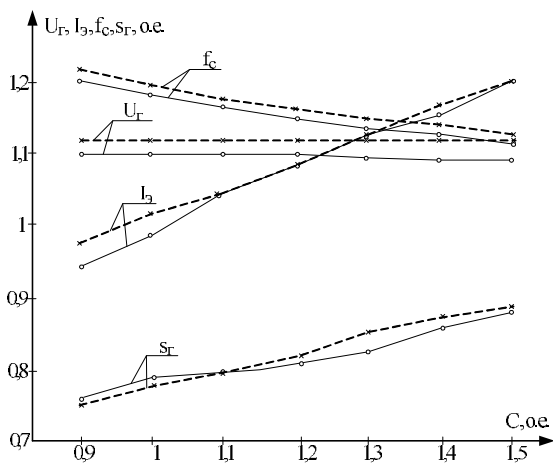


Рисунок 9 – Характеристики АГ при $U_T = \text{const}$ и сопротивлении нагрузки $R_n = 95 \text{ Ом}$

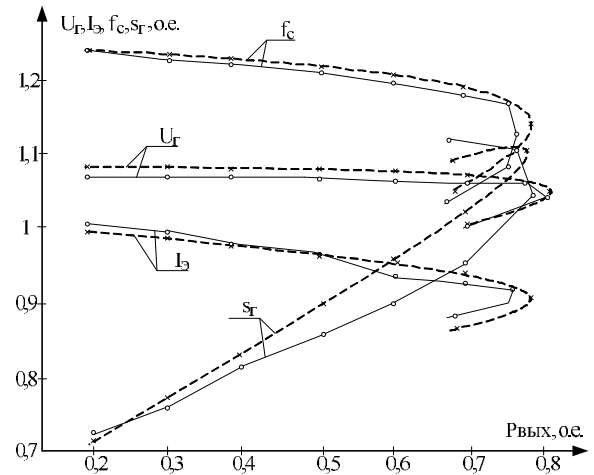


Рисунок 10 – Характеристики АГ от полезной мощности и емкости возбуждения ($C = C_n$)

ВЫВОДЫ. Представленный метод расчета нагрузочных характеристик асинхронного генератора при питании асинхронных двигателей, учитывающий изменение частоты напряжения в функции нагрузки, обеспечивает более высокую точность результатов по сравнению с существующими. Сравнительная характеристика теоретических и экспериментальных исследований показала, что расхождение между данными не превышает 4–6 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кицис С.И. Асинхронные самовозбуждающиеся генераторы. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 328 с.
2. Zobaа A.F., Bansal R.S. Handbook of Renewable Energy Technology. – Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd, 2011. – 851 p.
3. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 87 с.
4. Лищенко А.И., Лесник В.А., Фаренюк В.А. Исследование рабочих характеристик асинхронного генератора с емкостным возбуждением // Техническая электродинамика. – 1983. – № 5. – С. 62–68.
5. Кюрегян С.Г., Ткаченко А.М. Расчет рабочих характеристик автономного асинхронного генератора // Электротехника. – 1966. – № 11. – С. 20–22.
6. Кицис С.И. Расчет стационарных режимов асинхронного генератора с обмоткой подмагничивания, присоединенной к обмотке статора // Электричество. – 1978. – № 5. – С. 28–31.
7. Балагуров В.А., Кецарис А.А. Построение внешних характеристик асинхронного генератора // Электротехника. – 1974. – № 2. – С. 24–26.
8. Singh S.P., Jain M.P. Performance characteristics and optimum utilization of a cage machine induction generator // IEEE Trans. on En. Conv. – 1990. – Iss. 5, № 4. – PP. 679–685.
9. Williamson S. Induction motor modeling using finite elements / International Conf. on Electr. Mach., ICEM. – Paris, 1994. – Iss. 1. – PP. 1–8.
10. Гентковски З., Деменко А., Плахта Б. Схемно-полевая модель электромагнитных процессов в автономном асинхронном генераторе с конденсаторным возбуждением

// Техническая электродинамика, НАН Украины. – Киев, 1996. – № 1/2. – С. 37–46.

11. Сыромьятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 528 с.

12. Сергиенко С.А., Зачепа Ю.В. Метод расчета статических характеристик асинхронного генератора с емкостным возбуждением // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2012. – № 5. – С. 57–66.

13. ГОСТ 50783-95. Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования. – М.: Изд. стандартов, 1995. – 27 с.

ANALYSIS OF THE STATIC MODE OF AUTONOMOUS INDUCTION GENERATOR WITH CAPACITIVE SELF-EXCITATION

Yu. Zacheпа

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: zip@ukr.net

The paper presents a refined method of calculation of the static characteristics of asynchronous generator at work on dynamic active-inductive load, adjusting the frequency of generated voltage. Found that the neglect of changes in the function of the frequency of the voltage load of low-power results in significant inaccuracies in determining the boundaries of stable operation. Based on experimental studies proved the adequacy of the proposed method.

Key words: autonomous asynchronous generator, capacitor bank, motor load, external characteristics.

REFERENCES

1. Kitsis S.I. *Self-excited asynchronous generator*. – Moscow: Energoatomizdat, 2003. – 328 p. [in Russian]

2. Zobaa A.F., Bansal R.S. *Handbook of Renewable Energy Technology*. – Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd, 2011. – 851 p.

3. Toroptsev N.D. *Asynchronous generators for autonomous power installations*. – Moscow: NTF «Energoprogress», 2004. – 87 p.

4. Lishchenko A.I., Lesnik V.A., Farenuk V.A. Study the performance of asynchronous generator with capacitive excitation // *Technical Electrodynamics*. – 1983. – № 5. – PP. 62–68. [in Russian]

5. Kyureghyan S.G., Tkachenko A.M. The calculation of the performance of autonomous asynchronous generator // *Electrical engineering*. – 1966. – № 11. – PP. 20–22. [in Russian]

6. Kitsis S.I. Calculation of stationary modes of asynchronous generator with field winding connected to the stator winding // *Electricity*. – 1978. – № 5. – PP. 28–31. [in Russian]

7. Balagurov V.A., Ketsaris A.A. Construction of the external characteristics of the asynchronous generator // *Electrical engineering*. – 1974. – № 2. – PP. 24–26. [in Russian]

8. Singh S.P., Jain M.P. Performance characteristics and optimum utilization of a cage machine induction generator // *IEEE Trans. on En. Conv.* – 1990. – Iss. 5. – № 4. – PP. 679–685.

9. Williamson S. Induction motor modeling using finite elements / International Conf. on Electr. Mach., ICEM. – Paris, 1994. – Iss. 1. – PP. 1–8.

10. Gentkovski Z., Demenko A., Plahta B. Circuit-field model of the electromagnetic processes in the autonomous asynchronous generator with capacitor excitation // *Technical electrodynamics*, NAS of Ukraine. – Kiev, 1996. – № 1/2. – PP. 37–46. [in Russian]

11. Syromyatnikov I.A. *Modes of asynchronous and synchronous motors* / Ed. L.G. Mamikonyan. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 528 p. [in Russian]

12. Sergienko S.A, Zacheпа Yu.V. The method of calculation of the static characteristics of asynchronous generator with capacitive excitation // *News of higher educational institutions and*

associations of the CIS energy. Energy. – 2012. – № 5. – PP. 57–66. [in Russian]

13. GOST 50783-95. *Electrical apparatuses and mobile electric power from internal combustion engines. General requirements.* – Moskow: Izd. standartov, 1995. – 27 p. [in Russian]



Зачепа Юрий Владимирович,
ст. препод. каф. «Системы автоматического управления и электропривод»
КрНУ,
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина,
Тел. (05366) 3-11-47,
E-mail: zip@ukr.net

Стаття надійшла 01.02.2013
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Садовим О.В.