

## УТОЧНЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ЕМКОСТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

*Ю. В. Зачена, ст. преп.*

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина*

*E-mail: zip1981@ukr.net*

Приведен уточненный метод расчета статических режимов асинхронного генератора с емкостным возбуждением при работе на активную, активно-индуктивную и двигательную нагрузки с учетом влияния последней на частоту питающего напряжения.

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, нагрузочные характеристики, асинхронный двигатель.

**Введение.** Самовозбуждающиеся асинхронные генераторы (АГ) все чаще рассматриваются как источники автономного питания и применяются во многих областях, таких, как авиационная и химическая промышленности, гидроэнергетика, при генерации больших мощностей, а также в последнее время широко внедряются в так называемую малую гидро- и ветроэнергетику [1]. Более низкая себестоимость единицы продукции, конструкции бесщеточного ротора, низкий клирфактор, улучшение переходного процесса и встроенная защита от перегрузок – основные преимущества АГ перед синхронными генераторами переменного тока.

Известно, что если соответственно рассчитанные конденсаторы подключены к зажимам статорной обмотки асинхронной машины, то при вращении ротора с определенной скоростью [2] электродвижущая сила (ЭДС) индуцируется в обмотку статора машины. Переходный процесс самовозбуждения будет продолжаться до тех пор, пока напряжение генератора не станет равным напряжению на конденсаторе. Это приводит к достижению состояния равновесия, при котором асинхронная машина работает в качестве источника электроэнергии при некоторых значениях напряжения и частоты, зависящей от емкости конденсаторов, скорости первичного двигателя, параметров машины и нагрузки.

В настоящее время асинхронные генераторы в основном используются в качестве источников для питания активной нагрузки, такой, как освещение, нагревательные элементы, аппараты электросварки, а также электронные приборы. Анализ существующих научных работ в этом направлении показал, что уже довольно хорошо рассмотрено использование асинхронных машин в режиме самовозбуждения для обеспечения динамического торможения, а также для питания постоянных по характеру активной и активно-индуктивной нагрузок.

В то же время использованию асинхронных генераторов для питания электрических машин, которые характеризуются наличием пусковых токов и переменного коэффициента мощности, уделено недостаточно внимания.

**Анализ предыдущих исследований.** Работу АГ при изменяющейся величине выходного

напряжения, частоты, а также величине и характере нагрузки удобно анализировать на основании статических характеристик, расчет которых хорошо освещен в теории асинхронных генераторов с емкостным возбуждением.

Одними из первых методов были графические методы, основанные на круговой диаграмме асинхронной машины [3, 4]. В этих случаях круговая диаграмма обычно дополняется зависимостями  $U_e = f(b_\mu)$  и  $g_\mu = f(b_\mu, b_c)$ , которые получаются либо расчетным путем, либо на основе экспериментальных исследований ( $g_\mu, b_\mu$  – активная и реактивная составляющие проводимости намагничивающего контура фазы АГ,  $b_c$  – реактивная составляющая проводимости контура емкостного возбуждения). Однако, несмотря на простоту и наглядность графических методов, точность их достаточно низкая.

Для анализа рабочих характеристик АГ применяются графо-аналитические методы [5, 6]. В этой группе можно выделить подгруппу методов, основанных на балансе активных и реактивных проводимостей Г- или Т-образной схем замещения. Для расчета характеристик необходимо знать все параметры генератора и иметь зависимость ЭДС от индуктивного сопротивления намагничивающего контура  $E_e = f(X_\mu)$ , снятую при скольжении  $s=0$  и номинальной частоте, при этом нет необходимости в построении круговой диаграммы. Величина погрешности при этом составляет 5–10 %, кроме того, невозможно автоматизировать с помощью ЭВМ всю процедуру расчета.

В настоящее время наибольшее распространение при анализе нагрузочных режимов работы асинхронного генератора получили аналитические методы. Согласно этим методам, расчет проводят на основе все того же баланса активных и реактивных проводимостей Г-образной или Т-образной схемы замещения, а нелинейная характеристика намагничивания машины аппроксимируется одним из известных способов: кусочно-линейными, степенными функциями, тригонометрическими рядами, с использованием трансцендентных функций и др.

Однако все приведенные в литературе методы

имеют ряд допущений, сужающих область их практического применения. В большинстве работ [7, 8] частота генерируемого напряжения принимается постоянной, независимо от величины и характера нагрузки, что поддерживается путем изменения скорости вращения вала генератора. В ряде работ влиянием нагрузки на частоту генерируемого напряжения просто пренебрегают. Принимаемое в существующих методиках допущение о неизменности частоты при изменяющейся нагрузке допустимо лишь для машин большой мощности с номинальным скольжением, не превышающим 0,03. Так, на рис. 1 (точке А соответствует синхронная частота  $f_n = 50$  Гц, точке  $A_1$  – частота при номинальной нагрузке (скольжению)  $f_1 = f_n(1 - s_n)$ ) показано влияние изменения частоты напряжения на положение рабочей точки на характеристике холостого хода генератора, выполненного на базе типовой асинхронной машины АИР мощностью 1,2 кВт и номинальным скольжением  $s_n = 0,05$ .

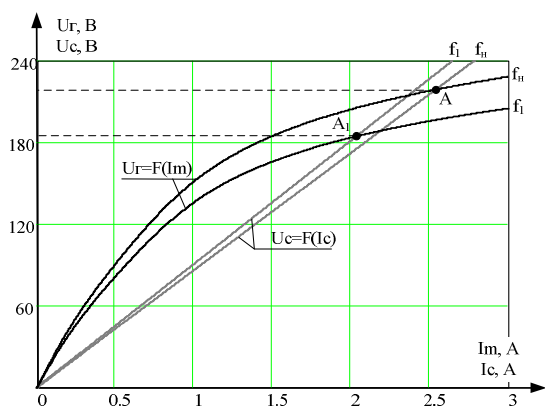


Рисунок 1 – Изменение положения рабочей точки АГ от частоты генерируемого напряжения

Неучет изменения частоты напряжения в расчетах статических характеристик асинхронных генераторов малой мощности приводит к

недопустимым ошибкам. В свою очередь, эти неточности влекут за собой ошибки при анализе нагрузочных способностей генераторов, выборе оптимального способа стабилизации напряжения при заданном коэффициенте мощности нагрузки, оптимизации параметров емкостной системы возбуждения (ЕСВ) и т.д. Особенно это усугубляется в случае, если и параметры нагрузки также зависят от частоты питающего напряжения, например, характеристики подключаемых электрических машин.

**Цель работы.** Анализ рабочих характеристик системы асинхронный генератор – асинхронный двигатель (АД) с учетом изменения частоты генерирования напряжения.

**Материал и результаты исследования.** Для расчета рабочих характеристик системы АГ-ЕСВ-АД воспользуемся одной из общепринятых схем замещения соответствующих электрических машин (рис. 2), которая описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} -(R_{1n} + \alpha jX_{1n})I_{1n} - \alpha jX_{\mu n}I_{\mu n} - \\ \quad - \alpha jX_c I_c = 0; \\ (\frac{R_{2n}}{s_\delta} + \alpha jX'_{2n})I_{2n} + \alpha jX_{\mu n}I_{\mu n} = 0; \\ -(R_1 + \alpha jX_1)I_1 - \alpha jX_\mu I_\mu + \alpha jX_c I_c = 0; \quad (1) \\ (\frac{R_2}{s_2} + \alpha jX'_2)I_2 + \alpha jX_\mu I_\mu = 0; \\ I_1 - I_{1n} - I_c = 0; \\ -I_1 - I_2 + I_\mu = 0, \end{cases}$$

где  $R_{1n}$ ,  $R'_{2n}$ ,  $R_{\mu n}$  – активные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АД;  $X_{1n}$ ,  $X'_{2n}$ ,  $X_{\mu n}$  – реактивные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АД;  $I_{1n}$ ,  $I_{2n}$ ,  $I_{\mu n}$  – токи статорной, роторной цепей и контура намагничивания АД;  $I_c$  – ток ЕСВ;

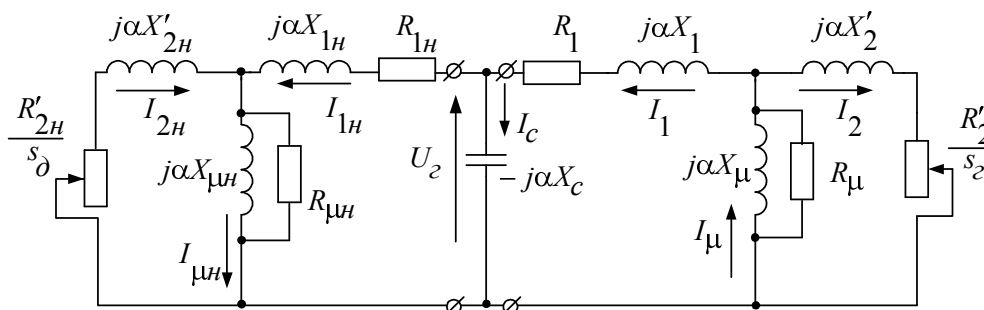


Рисунок 2 – Схема замещения системы АГ-ЕСВ-АД

$X_c$  – реактивное сопротивление ЕСВ;  $R_1$ ,  $R'_2$ ,  $R_\mu$  – активные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АГ;  $X_1$ ,  $X'_2$ ,  $X_\mu$  –

реактивные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АГ;  $I_1$ ,  $I'_2$ ,  $I_\mu$  – токи статорной, роторной цепей и контура намагничивания АГ;  $s_2$ ,  $s_\delta$  – скольжения АГ и АД;

$\alpha = \frac{f}{f_n}$  – относительная частота

генерированного напряжения  $U_2$ .

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:

$$s_2 = \frac{1 - \alpha}{\alpha}.$$

Поставленную задачу можно условно разбить на три этапа. Сначала по известным паспортным данным подключаемого к зажимам АГ асинхронного двигателя находим номинальные значения скольжения  $s_0$  и сопротивления контура намагничивания  $X_{\mu n}$ , которые рассчитываются для соответствующих значений скорости вращения генератора  $\omega_0$  и частоте  $f_n = 50$  Гц.

Далее для определения недостающих параметров воспользуемся известным методом представления АД в статических режимах эквивалентной RL-цепью с параметрами [9]

$$\begin{aligned} R_n &= R_{1n} + \frac{X_{\mu n}^2}{s_D (X_{\mu n} + X'_{2n})^2 + R_{2n}'^2}, \\ X_n &= X_{1n} + \frac{X_{\mu n} R_{2n}'}{R_{2n}'} - \\ &\quad - \frac{R_n s_D (X_{\mu n} + X'_{2n})}{R_{2n}'}, \end{aligned} \quad (2)$$

которые могут быть рассчитаны для любого значения скольжения двигателя  $s_0$ .

Таким образом, схему замещения на рис. 2 можно представить в виде рис. 3.

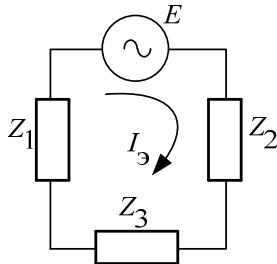


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения системы АГ-ЕСВ-АД

С учетом выполненных преобразований, на основе второго закона Кирхгофа получим

$$I_3 Z_\Sigma = E, \quad (3)$$

где  $Z_\Sigma = Z_1 + Z_2 + Z_3$  – полное сопротивление цепи, определяющееся как:

$Z_1 = R_1 + j\alpha X_1$  – полное сопротивление статорной цепи АГ;  $Z_2 = R_1 + j\alpha X_1 + Z_3 - j\alpha X_c$  – полное сопротивление цепей нагрузки и емкостного возбуждения (ЕСВ);

$$\begin{aligned} Z_3 &= \frac{-\alpha^2 X_2' X_{\mu} + \alpha^3 X_2' X_{\mu} + j\alpha X_2' R_{\mu} -}{j\alpha X_2' - j\alpha^2 X_2' + \alpha R_2' +} - \text{ полное} \\ &\quad \frac{-j\alpha^2 X_2' R_{\mu} + j\alpha^2 R_2' X_{\mu} + \alpha R_2' R_{\mu}}{+ j\alpha X_{\mu} - j\alpha^2 X_{\mu} + R_{\mu} - \alpha R_{\mu}} \end{aligned}$$

сопротивление цепей ротора и намагничивания АГ;  $E = \varphi \omega_0 = L_{\mu} I_{\mu} \omega_0$  – ЭДС генератора;  $I_3$  – приведенный ток цепи АГ-АД.

Ввиду того, что входящие в уравнение (3) составляющие полного сопротивления  $Z_\Sigma$  цепи являются комплексными величинами, представим эти выражения в удобном для последующих преобразований виде. Тогда, используя свойства комплексных чисел, на основе ряда математических преобразований получим:

– полное сопротивление статорной цепи АГ

$$Z_1 = A_1 + jB_1,$$

где  $A_1 = R_1$  – действительная часть сопротивления  $Z_1$ ,  $B_1 = \alpha X_1$  – мнимая часть сопротивления  $Z_1$ ;

– полное сопротивление цепей нагрузки и емкостного возбуждения

$$Z_2 = A_0 + jB_0,$$

где  $A_0 = \frac{\alpha^2 X_c^2 R_n}{R_n^2 + \alpha^2 X_c^2 + 2\alpha^2 X_c X_n + \alpha^2 X_n^2}$

– действительная часть сопротивления  $Z_2$ ,

$$B_0 = \frac{\alpha X_c R_n^2 + \alpha^3 X_c^2 X_n + \alpha^3 X_n^2 X_c}{R_n^2 + \alpha^2 X_c^2 + 2\alpha^2 X_c X_n + \alpha^2 X_n^2}$$

– мнимая часть сопротивления  $Z_2$ ;

– полное сопротивление цепей ротора и намагничивания АГ

$$Z_3 = A_2 + jB_2,$$

$$\begin{aligned} \text{где } A_2 &= \frac{\alpha^6 X_2'^2 R_{\mu} X_{\mu}^2 - 2\alpha^5 X_2'^2 R_{\mu} X_{\mu}^2 +}{\alpha^6 X_2'^2 X_{\mu}^2 - 2\alpha^5 X_2'^2 X_{\mu}^2 +} \\ &\quad + \alpha^4 X_2'^2 R_{\mu} X_{\mu}^2 + \alpha^4 R_2'^2 R_{\mu} X_{\mu}^2 \\ &\quad + \alpha^4 X_2'^2 R_{\mu} - 2\alpha^3 X_2'^2 R_{\mu}^2 + \alpha^2 X_2'^2 R_{\mu}^2 \end{aligned}$$

– действительная часть сопротивления  $Z_3$ ,

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{\alpha^5 X_2'^2 R_{\mu}^2 X_{\mu} - 2\alpha^4 X_2'^2 R_{\mu} X_{\mu} +}{\alpha^6 X_2'^2 X_{\mu}^2 - 2\alpha^5 X_2'^2 X_{\mu}^2 + \alpha^4 X_2'^2 X_{\mu}^2 +} \\ &\quad + \alpha^3 X_2'^2 R_{\mu}^2 X_{\mu} + \alpha^3 R_2'^2 R_{\mu}^2 X_{\mu} \\ &\quad + \alpha^4 X_2'^2 R_{\mu}^2 - 2\alpha^3 X_2'^2 R_{\mu}^2 + \alpha^2 X_2'^2 R_{\mu}^2 \end{aligned}$$

– мнимая часть сопротивления  $Z_3$ .

В результате несложных математических преобразований получаем систему нелинейных уравнений с двумя неизвестными:

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

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 (4) могут быть получены значения реактивного сопротивления контура намагничивания асинхронного генератора и относительная частота генерируемого напряжения. После этого напряжение генератора может быть вычислено согласно характеристике намагничивания  $U = f(I_\mu)$ , а действующее напряжение в цепи определяется аналитически либо графически на основе характеристики заряда конденсаторной батареи  $U = f(I_c)$ . Далее алгоритм расчета повторяется согласно полученным значениям напряжения  $U_G$ , частоты  $f$ , реактивного сопротивления  $X_\mu$  и скольжения АД  $s_\delta$  до достижения допустимой ошибки последних двух итераций.

На основе разработанного метода для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общепромышленного исполнения типа АИР80А4СУ2:  $R_n=1,2$  кВт;  $n_n=2740$  об/мин;  $I_1=2,93$  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, активно-индуктивную и двигательную нагрузки (рис. 4–6).

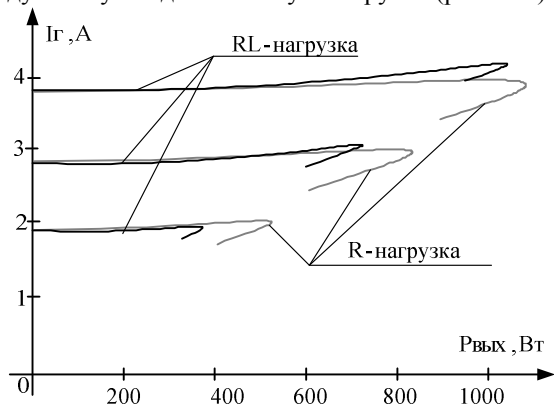


Рисунок 4 – Зависимость тока генератора от выходной мощности

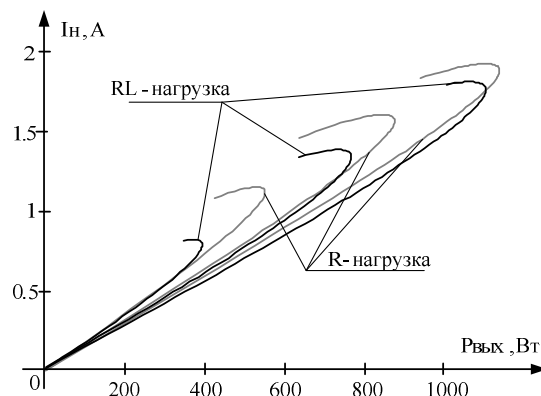


Рисунок 5 – Зависимость тока нагрузки от выходной мощности генератора

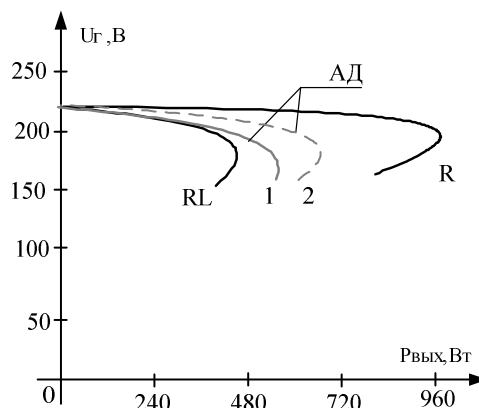


Рисунок 6 – Зависимость напряжения генератора от выходной мощности

На рис. 6 кривая 1 – внешняя характеристика АГ, рассчитанная по предлагаемому методу, кривая 2 – характеристика генератора без учета изменения частоты питающего напряжения.

Для проверки адекватности предлагаемой методики для системы АГ-ЕСВ-нагрузка были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 7–8 (экспериментальные характеристики показаны сплошными линиями, а расчетные – пунктирными).

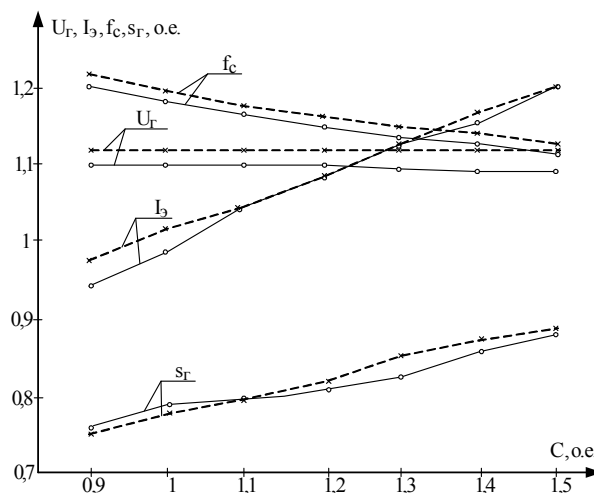


Рисунок 7 – Характеристики АГ при постоянном напряжении и сопротивлении нагрузки (95 Ом) при изменении емкости возбуждения

Для удобства анализа все величины даны в относительных величинах.

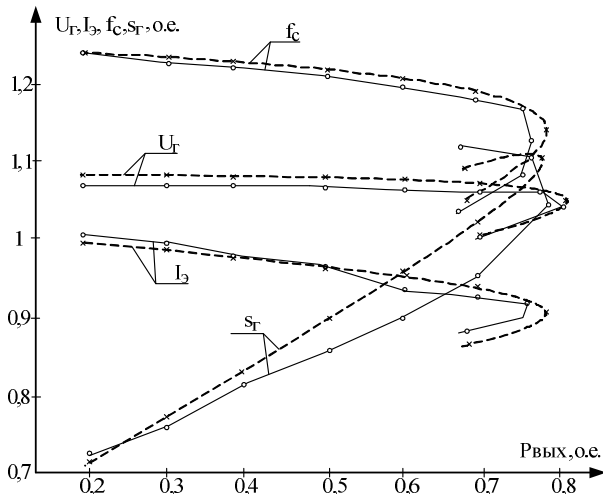


Рисунок 8 – Характеристики АГ от полезной мощности и емкости возбуждения ( $C=C_n$ )

**Выводы.** Предложенный алгоритм является эффективным при анализе статических режимов работы системы АГ-АД с учетом изменения частоты питания. Сравнительная характеристика теоретических и экспериментальных исследований показала, что расхождение между данными не превышает 4–6 %.

Неучет изменения частоты питающего напряжения в функции нагрузки приводит к значительным неточностям при анализе нагрузочных способностей генератора (рис. 6, кривые 1 и 2), что может повлиять на работоспособность всей системы генерации энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горопцев Н.Д.: Авиационные асинхронные генераторы. – М.: Транспорт, 1976. – 204 с.
2. Горопцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2004. – 88 с.
3. Зубков Ю.Д. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением. – Алма-Ата: Изд-во АН Каз.ССР, 1949. – 112 с.
4. Иванов А.А. Асинхронные генераторы для гидроэлектрических станций небольшой мощности. М.: Госэнергоиздат, 1948. – 139 с.
5. Кюреян С.Г., Ткаченко А.М. Расчет рабочих характеристик автономного асинхронного генератора // Электротехника. – 1966. – № 11. – С. 20–22.
6. Шумов Ю.Н. К расчету внешних характеристик автономного асинхронного генератора // Изв. вузов. Электромеханика. – 1978. – № 7. – С. 787–789.
7. Лищенко А.И., Лесник В.А., Фаренюк В.А. Исследование рабочих характеристик асинхронного генератора с емкостным возбуждением. Техническая электродинамика. – Киев, 1983. – № 5. – С. 62 – 68.
8. Quin N.P., Williams P.N.: Transient electrical and mechanical behaviour of large induction generator installations. 4. Intern. Conf. On Electr. Mach. and Drives, IEEE Conf. Publ., № 10, 1989. – P. 251–255.
9. Электрические машины: Асинхронные машины: [учеб. для электромех. спец. вузов] / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович; под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.

Стаття надійшла 30.06.2011 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## УТОЧНЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ЄМНІСНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Ю. В. Зачепа, ст. викл.

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

Наведено уточнений метод розрахунку статичних режимів асинхронного генератора з ємнісним збудженням при роботі на активне, активно-індуктивне й рухове навантаження з урахуванням впливу останнього на частоту напруги живлення.

**Ключові слова:** асинхронний генератор, навантажувальні характеристики, асинхронний двигун.

## AN IMPROVEMENT OF THE LOAD CHARACTERISTICS CALCULATION INDUCTION GENERATORS WITH CAPACITIVE EXCITATION

Y. Zachepa, Sen. Lect.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyy National University  
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine  
E-mail: zip1981@ukr.net

This paper gives a refined method of calculation of static modes of induction generator with capacitive excitation at work on an active, active-inductive and motor loads, taking into account the influence of the latter on the frequency of the supply voltage.

**Key words:** induction generator, load characteristics, induction motor.