

Ю. В. ЗАЧЕПА, канд. техн. наук, доц. КрНУ

УСЛОВИЯ ГАРАНТИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОГО ФОРМИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА

Введение. Известно, что для стабильной работы асинхронного генератора (АГ) в составе формируемого источника автономного электропитания (ФИАЭ) необходимо обеспечить два условия – наличие регулируемых источников реактивной и механической энергии. Первое осуществляется с помощью установки конденсаторных батарей, второе – посредством механического соединения АГ с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) или другим источником механической энергии (ветро-, гидротурбина и т.д.) [1]. Основной особенностью возбуждения АГ является то, что оно осуществляется по цепи нагрузки и каналу передачи реактивной энергии. Поэтому при определении перегрузочной способности генератора основное внимание уделяется выбору регулятора емкостного тока возбуждения и количества ступеней конденсаторных батарей [2]. В тоже время с целью минимизации массогабаритных показателей и повышения мобильности дизель-генераторные установки (ДГУ) характеризуются соизмеримостью мощностей ДВС и АГ, что также накладывает определенные условия на границы безаварийной работы таких систем генерации энергии.

Цель работы. Определение условий гарантированного возбуждения асинхронного генератора в зависимости от параметров дизельного двигателя внутреннего сгорания.

Материалы исследования. Относительное значение частоты вращения ротора АГ (частоты вращения ДВС), соответствующее данной частоте возбуждения определяется по выражению [3]:

$$v = \alpha(1 + |s_e|), \quad (1)$$

где $v = \omega_\delta / \omega_{0\delta} = 1 - \delta$ – относительное значение частоты вращения ротора АГ, выраженное через частоту вращения ДВС (при условии жесткой связи валов АГ и ДВС; ω_δ – текущее значение частоты вращения ДВС; $\omega_{0\delta}$ – заданное значение частоты вращения ДВС; $\delta = \Delta\omega_\delta / \omega_{0\delta}$ – статизм ДВС.

Для стабилизации частоты вращения ДГУ оснащаются автоматическими регуляторами частоты вращения двигателя внутреннего сгорания (РЧД) непрямого действия, работающие по принципу Ползунова–Уатта [4]. Регуляторы такого типа имеют структуру изодромного регулятора с гибкой обратной связью и содержат следующие элементы: чувствительный, усилительный и вспомогательные элементы.

– *Сервомотор.* Уравнение движения поршня сервомотора устанавливает связь между перемещениями управляющего золотника ξ и поршня сервомотора λ :

$$T_c d\lambda / dt = \xi, \quad (2)$$

где T_c – постоянная времени сервомотора, характеризующая его инерционность.

Как видно из уравнения (2) сервомотор не может обеспечить устойчивую работу регулятора, т.к. при малейшем смещении золотника из среднего положения поршень перемещается в одно из своих крайних положений до упора. Поэтому сервомоторы в РЧД дополняются стабилизирующими обратными связями.

– *Механическая связь: муфта и золотник.* Связь между перемещениями муфты η и золотника ξ :

$$\xi = i_1 \eta, \quad (3)$$

где i_1 – передаточное отношение рычажного механизма от муфты к золотнику.

– *Механическая связь: сервомотор и рейка.* Связь между перемещениями штока сервомотора λ и рейкой топливного насоса χ :

$$\lambda = -i_2 \chi, \quad (4)$$

где i_2 – передаточное отношение между перемещениями рейки и штоком сервомотора.

Знак “–” означает, что при положительном смещении поршня сервомотора (это соответствует увеличению частоты вращения при сбросе нагрузки) рейка переместится в сторону уменьшения подачи топлива.

– *Изодром.* Связь между перемещением золотника ξ и перемещением буксы ψ :

$$T_{из} d\psi / dt + \psi = T_{из} k_{из} d\lambda / dt, \quad (5)$$

где $T_{из}$ – постоянная времени изодрома; $k_{из}$ – коэффициент связи между перемещением поршня сервомотора и поршня изодрома.

– Чувствительный элемент. В операторной форме уравнение движения элемента имеет вид:

$$T_p^2 p^2 \eta + T_k p \eta + \delta_z \eta = \theta_\omega \varphi - \theta_p \alpha_p, \quad (6)$$

где T_p – постоянная времени чувствительного элемента; T_k – постоянная времени катаракта, характеризующая силы гидравлического трения регулятора; δ_z – местная степень неравномерности; η – перемещение муфты чувствительного элемента; φ – скорость коленчатого вала дизеля; α_p – перемещение рейки рычага управления; θ_p – коэффициент усиления по настройке скоростного режима; θ_ω – коэффициент связи между перемещением муфты и частотой вращения.

Подобные РЧД обеспечивают стабилизацию частоты вращения ДВС на заданном уровне. Однако, как известно, ДВС характеризуются относительно небольшим диапазоном регулирования, что в свою очередь, накладывает определенные ограничения на границы самовозбуждения АГ.

Для АГ с конденсаторным возбуждением характерными являются нижняя и верхняя критические частоты вращения ротора. Так, для нижней границы скорости выражение (1) примет вид

$$v_{к.н.} = \alpha_{к.н.} (1 + |s_{к.н.}|), \quad (7)$$

где $v_{к.н.} = 1 - \delta_{крит}$; $\alpha_{к.н.} = \sqrt{X_c (2\sigma X_1)^{-1} (1 + \sigma - R_1^2 / X_1 X_c - (1 + \sigma - R_1^2 / X_1 X_c)^2 - 4\sigma)}$ – нижняя критическая частота самовозбуждения АГ; $\sigma = 1 - X_\mu^2 / X_1 X_2'$ – коэффициент рассеяния АГ; $R_1 = C_1 R_1$ и $R_2 = C_1^2 R_2'$ – активные сопротивления обмоток статора и ротора; X_1 , X_2' , X_μ – реактивные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АГ соответственно; X_c – реактивное сопротивление конденсаторов возбуждения; R_n и X_n – активное и реактивное сопротивления нагрузки на зажимах АГ; $|s_{к.н.}| = R_2' g_1$ – скольжение АГ для $\alpha_{к.н.}$ согласно [3]; $g_1 = qd / (q^2 + p^2)$ – активная проводимость цепи статора:

$$d = \alpha^2 R_n^2 + (\alpha^2 X_n - X_c)^2; \quad q = R_n X_c^2 + R_1 d; \quad p = \alpha (X_c (R_n^2 + X_n (\alpha^2 X_n - X_c) - X_1 d)).$$

Подставив соответствующие выражения в (7), получим

$$(1 - \delta_{крит})(R_n X_c^2 (1 + \delta_{крит})^2 + R_1 R_n^2) - R_n X_c^2 \sqrt{X_c / X_n} (1 + \delta_{крит})^2 - R_n^2 \sqrt{X_c / X_n} (R_1 - R_2') = 0. \quad (8)$$

или

$$a_3 \delta_{крит}^3 + a_2 \delta_{крит}^2 + a_1 \delta_{крит} + a_0 = 0, \quad (9)$$

где $a_0 = R_1 X_c^{-2} + R_n X_c^{-2} (R_1 - R_2') \sqrt{X_c / X_n} + \sqrt{X_c / X_n} - 1$; $a_1 = 2 R_1 R_n X_c^{-2} + 2 \sqrt{X_c / X_n} - 1$; $a_2 = 1 + \sqrt{X_c / X_n}$; $a_3 = 1$ – постоянные коэффициенты, определяемые через параметры АГ, емкостной системы возбуждения и нагрузки.

Аналитическое выражение для определения критического значения статизма дизельного двигателя может быть получено, например, с применением формулы Кардано. Для этого преобразуем исходное уравнение (9) к каноническому виду используя замену переменной $\delta_{крит} = y - \frac{a_2}{3a_3}$:

$$y^3 + py^2 + q = 0, \quad (10)$$

где $p = \frac{3a_1 - a_2^2}{3}$; $q = \frac{2a_2^3 - 9a_2 a_1 + 27a_0}{27}$.

Решение уравнения (10) определяется знаком выражения по определению дискриминанта:

$$D = [4(3a_1 - a_2)^3 + (2a_2^2 - 9a_1 a_2 + 27a_0)^2] / 2916. \quad (11)$$

В результате имеем: при $D > 0$ – один вещественный корень; при $D = 0$ – два вещественных корня; при $D < 0$ – три вещественных корня.

На рис. 1 представлены зависимости дискриминанта $D = f(R_n, X_n, X_c)$ в функции параметров нагрузки и емкости возбуждения. Ввиду того, что параметры X_c емкостной системы возбуждения определяются параметрами нагрузки, зависимость дискриминанта $D_{X_c=const} = f(R_n, X_n)$ выполним в функции нагрузки при опреде-

ленных значениях емкости возбуждения. Параметры последней принимались в диапазоне $[C_{\min}; 10C_{\min}]$, где $C_{\min}$ – минимально-допустимое значение емкости для возбуждения АГ на холостом ходу.

Как видно из рис. 1, значение дискриминанта D при любых параметрах нагрузки всегда больше нуля. Поэтому критическое значение статизма дизельного двигателя определяется как:

$$\delta_{\text{крит}} = \sqrt[3]{[-2a_2^3 + 9a_2a_1 - 27a_0 + \sqrt{(2a_2^3 - 9a_2a_1 + 27a_0)^2 + 4(3a_1 - a_2^2)^3}]/54} - a_2/3. \quad (12)$$

Адекватность определения перегрузочной способности АГ в зависимости от параметров дизельного двигателя устанавливалась путем сравнения расчетов значения относительного значения скорости $v_{\text{к.н.}}$ вращения генератора для нижней границы по предлагаемому методу и экспериментальным данным, приведенным в [3]. Ошибка расчетов составила 7,5 %.

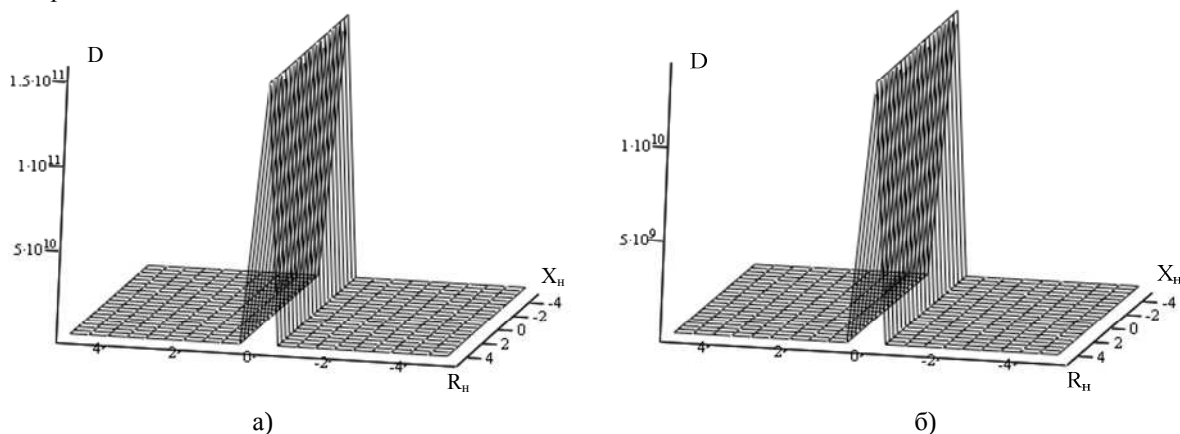


Рис. 1 Зависимость дискриминанта $D_{X_c=\text{const}} = f(R_n, X_n)$: а) при $C_{\min}$; б) при $10C_{\min}$.

Для более конкретного определения количества вещественных корней $\delta_{\text{крит}}$ и их расчетных формул были выполнены исследования зависимости дискриминанта $D = f(R_n, X_n, X_c)$ в функции параметров нагрузки и емкости возбуждения. В результате, дискриминант может принимать значение равное нулю $D=0$ при параметрах емкостной системы возбуждения $C_{\Sigma} \geq 30C_{\min}$ (рис. 2, а), а значения дискриминанта меньше нуля $D < 0$ возможно при $C_{\Sigma} \geq 150C_{\min}$ (рис. 2, б) и отрицательном значении R_n , что не соответствует реальным параметрам ДГУ и условиям ее работы.

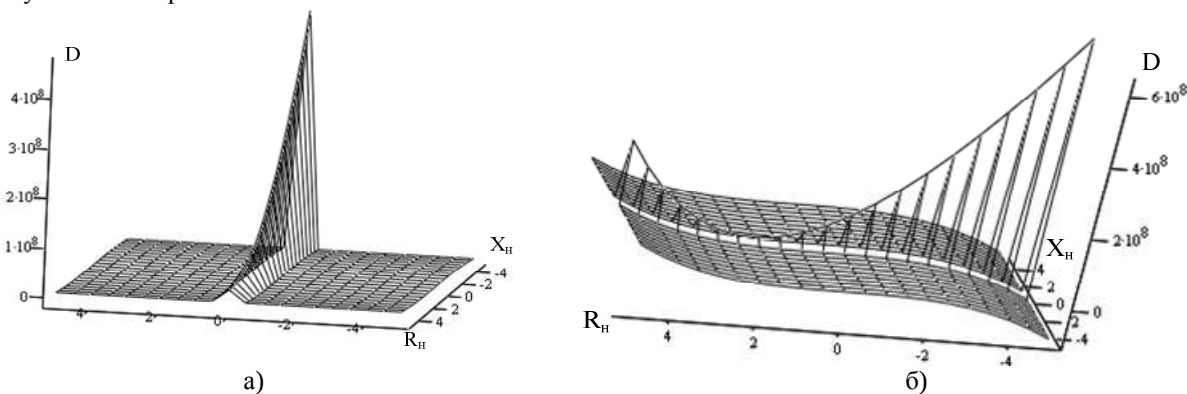


Рис. 2 Зависимость дискриминанта $D_{X_c=\text{const}} = f(R_n, X_n)$: а) при $30C_{\min}$; б) при $150C_{\min}$.

На рис. 3 представлены характеристики ДГУ с РЧД, параметры которого рассчитаны на основе предлагаемого метода. Исследования проводились на математической модели, приведенной в [2]. При моделировании режимов работы использовался ДВС, применяемый в дизель-генераторных электростанциях типа DALGAKIRAN DJ4000 с параметрами, приведенными в табл. 1. В качестве источника электрической энергии использовался асинхронный двигатель типа АИР120А4, работающий в генераторном режиме с емкостным са-

Таблица 1 – Технические характеристики ДГУ

Модель	DJ 4000 DG-ECS
Тип	одноцилиндровый с воздушным охлаждением
Фирма	Genpower
Максимальная мощность	7.0 кВА
Частота вращения	3000 об/мин
Объем	418 см ³
Запас хода – емкость бака	240 г/кВт – 16 л

моного метода. Исследования проводились на математической модели, приведенной в [2]. При моделировании режимов работы использовался ДВС, применяемый в дизель-генераторных электростанциях типа DALGAKIRAN DJ4000 с параметрами, приведенными в табл. 1. В качестве источника электрической энергии использовался асинхронный двигатель типа АИР120А4, работающий в генераторном режиме с емкостным са-

мовозбуждением $C = 30$ мкФ. На шестой секунде после запуска ДВС производилось подключение АГ к выходному валу посредством соединительной муфты. В момент времени $t_{on} = 7$ с симулировался режим подключения к зажимам генератора RLC-нагрузки, а в момент времени $t_{off} = 12$ с – нагрузка отключалась. Характеристики на рис. 3 представлены в следующих масштабах: $\omega_z = \omega_{rms} = 1/8$; $M_{kr} = 1/2$; $M_G = 1/1$, $U_g = 1/30$, $f_z = f_{rms} = 1/10$. Анализ полученных характеристик показал, что РЧД полностью компенсирует статическую ошибку регулирования по частоте вращения ДВС и стабилизирует частоту f_{rms} генерируемого напряжения на заданном уровне. Характеристики АГ приведены без подключения дополнительной емкости, необходимой для стабилизации амплитуды генерируемого напряжения, с целью наглядной демонстрации соблюдения условия гарантированного возбуждения АГ согласно предлагаемого метода.

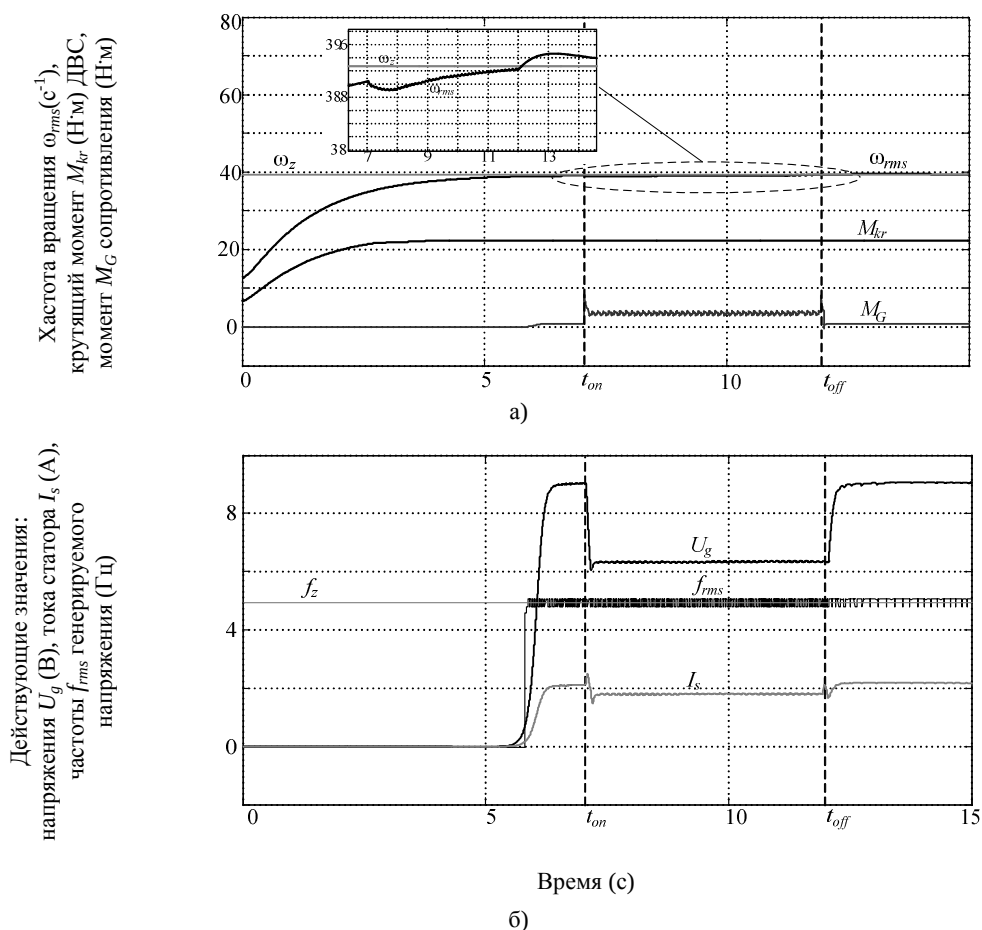


Рис. 3 Динамические характеристики ДГУ: а) характеристики ДВС; б) характеристики АГ с RLC-нагрузкой.

Выводы. Полученное в работе аналитическое выражение по определению статической ошибки регулирования частоты вращения дизельного двигателя в функции параметров асинхронного генератора и его емкостной системы возбуждения позволяет определить минимально-допустимое значение частоты вращения дизеля, которое должен обеспечить соответствующий регулятор, для предотвращения срыва генерации при подключении нагрузки.

Список литературы: 1. Zobaа A. F. Handbook of Renewable Energy Technology / A. F. Zobaа, R. C. Bansal. – Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd, 2011. – 851 p. 2. Zagirnyak M. Estimation of induction generator overload capacity under connected direct current consumers / M. Zagirnyak, Iu. Zacheпа, V. Chenchevoy // Acta Technica. – Praga: Institute of Thermomechanics AS CR. – Vol. 59(2014), № 2. – PP 149–169. 3. Каишкaлoв В. И. Конденсаторное торможение асинхронных двигателей / В. И. Каишкaлoв – М.: Энергия, 1977. – 121 с. 4. Грунауэр А. А. Применение ЭВМ для изучения динамики САР ДВС: учеб. пособие / А. А. Грунауэр, И. Д. Долгих. – К: УМКВО, 1989. – 285 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zobaа, A. F. and R. C. Bansal. *Handbook of Renewable Energy Technology*. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd, 2011. Print. 2. Zagirnyak, M., Iu. Zacheпа and V. Chenchevoy. "Estimation of induction generator overload capacity under connected direct current consumers." *Acta Technica*. – Praga: Institute of Thermomechanics AS CR.: Vol. 59(2014), № 2. 149–169. Print. 3. Kashkalov, V. I. *Kondensatornoe tormogienie asinhronnyh dvigateley*. Moscow: Jenergiya, 1977. Print. 4. Granujer, A. A. and I. D. Dolgih. *Primenenie EVM dlja izuchenija dinamiki SAR DVS: ucheb. posobie*. Kyiv: UM-KVO, 1989. Print.

Поступила (received) 14.07.2015