

К.С. Осипенко*, В.Я. Жуйков**, докт.техн.наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. e-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

Представлено спрощену структурну схему системи електроживлення з дизель-генератором, процеси в якому описуються системою рівнянь Парка-Горева. Наведено структурні схеми та передаточні функції дизель-генератора в областях низьких, середніх та високих частот. Показано, що представлення дизель-генератора окремими моделями у зазначених областях частот дозволяє знизити порядок рівнянь вихідної моделі та визначити відповідні умови стійкості за спрощеними співвідношеннями. Бібл. 5, рис. 2.

Ключові слова: система електроживлення, розподілена генерація, дизель-генератор, стійкість.

Вступ. Особливість сучасного етапу розвитку електроенергетичного комплексу України полягає у масштабному впровадженні систем розподіленої генерації з відновлюваними джерелами енергії, що забезпечує надійне, безперебійне та кероване споживачем електропостачання [1]. Для ефективної роботи розподілених систем електроживлення, окрім мінімізації втрат енергії, забезпечення відбору максимальної енергії від відновлюваних джерел та відповідних параметрів якості напруги на навантаженні, необхідно також забезпечити стійкість їхньої роботи. Системи, що розглядаються, є суттєво нелінійними, однак за умови незначних збурень доцільно здійснювати їхню лінеаризацію, що дозволить отримати необхідні умови стійкості систем у малому за спрощеними співвідношеннями.

Високий порядок рівнянь, що описують роботу дизель-генератора як однієї з основних складових частин системи електроживлення, режим роботи якого визначає параметри напруги на навантаженні та режими роботи відновлюваних джерел, значна кількість ланок зворотного зв'язку в колах окремих генераторів та наявність зворотних зв'язків загальної розподіленої системи обумовлюють високий порядок математичної моделі, що ускладнює отримання простих умов стійкості. Тому метою роботи є розробка спрощеної методики розрахунку умов стійкості системи електроживлення з дизель-генератором за рахунок побудови окремих моделей більш низьких порядків для конкретних частотних областей. Такий підхід дозволяє значно зменшити порядок загальної системи рівнянь та отримати прозорі умови стійкості.

Математична модель дизель-генератора. Спрощену схему системи електроживлення на основі дизель-генератора (ДГ), в якій споживання енергії відбувається на постійному струмі, зображено на рис. 1, де позначено: $R_a, R_b, R_c, L_a, L_b, L_c$ – активні опори та індуктивності фазних обмоток статора синхронного генератора (СГ); VD_1 - VD_6 – вентилі трифазного випрямляча (В); R_H, L_H – активний опір та індуктивність навантаження; РОЗ – регулятор обмотки збудження; ДН, ДС – датчики напруги та струму; U^*I – датчик потужності. Наведена схема має два канали зворотного зв'язку: за потужністю на валу дизельного двигуна (ДД) та за напругою обмотки збудження. Передатні функції по кожному з каналів визначаються наступним чином: $W_1(p) = U_{H\xi}(p)/M_{m\xi}(p)$ – передатна функція вихідної напруги на навантаженні до вхідного моменту на валу дизельного двигуна; $W_2(p) = U_{H\xi}(p)/U_{f\xi}(p)$ – передатна функція вихідної напруги на навантаженні до вхідної напруги обмотки збудження. Оскільки РОЗ працює в кілогерцовому частотному діапазоні, стала часу ДД значно більша за період комутації вентилів, а керування як по першому, так і по другому каналу здійснюється за

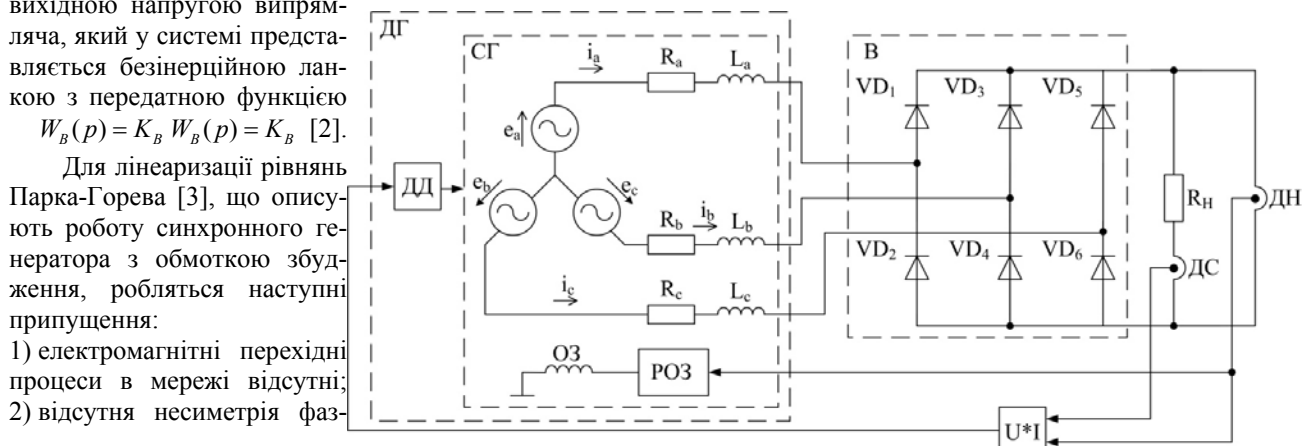


Рис. 1

© Осипенко К.С., Жуйков В.Я., 2016

ORCID ID: * - <http://orcid.org/0000-0002-6674-8332>; ** - <http://orcid.org/0000-0002-3338-2426>

них струмів та напруг; 3) процеси в демпферних обмотках не враховуються. Оскільки досліджується стійкість у малому, здійснюється перехід до системи рівнянь зі змінними $\psi_d = \psi_{d0} + \psi_{d\xi}$, $\psi_q = \psi_{q0} + \psi_{q\xi}$, $\psi_f = \psi_{f0} + \psi_{f\xi}$, $u_d = u_{d0} + u_{d\xi}$, $u_q = u_{q0} + u_{q\xi}$, $u_f = u_{f0} + u_{f\xi}$, $\omega = \omega_0 + \omega_\xi$, $M_{kp} = M_{kp0} + M_{kp\xi}$, де ψ_{d0} , ψ_{q0} , ψ_{f0} , u_{d0} , u_{q0} , u_{f0} , ω_0 , M_{kp0} – значення потокозчеплень, напруги, частоти та крутного моменту, що відповідають певному конкретному ustalеному режиму роботи, і входять до рівнянь як постійні коефіцієнти при відомих величинах струмів генератора

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{d\xi}}{dt} + \omega_\xi \psi_{q\xi} + \frac{r}{L_d} \psi_{d\xi} - \frac{r}{L_d} \cdot \frac{L_{ad}}{L_f} \psi_{f\xi} &= u_{d\xi}, & \frac{d\psi_{q\xi}}{dt} - \omega_\xi \psi_{d\xi} + \frac{r}{L_q} \psi_{q\xi} &= u_{q\xi}, \\ \frac{d\psi_{f\xi}}{dt} + \frac{r_f}{L_f} \psi_{f\xi} - \frac{r_f}{L_f} \cdot \frac{L_{ad}}{L_d} \psi_{d\xi} &= u_{f\xi}, & J \frac{d\omega_\xi}{dt} + \omega_\xi L_\xi &= M_{kp\xi} - \left(\frac{1}{L_q} \psi_{d\xi} \psi_{q\xi} - \frac{1}{L_d} \psi_{d\xi} \psi_{q\xi} \right), \\ \frac{dM_{kp\xi}}{dt} &= \frac{M_m}{\tau} - \frac{M_{kp\xi}}{\tau}, \end{aligned}$$

де $\psi_{d\xi}$, $\psi_{q\xi}$ – прирости потокозчеплення по поздовжній та поперечній вісям; $\psi_{f\xi}$ – приріст потокозчеплення обмотки збудження; ω_ξ – приріст частоти обертання; $u_{d\xi}$, $u_{q\xi}$ – прирости напруги статора по поздовжній та поперечній вісям; r , r_f – активний опір обмотки статора та обмотки збудження; L_d , L_q , L_f – індуктивності обмотки статора по поздовжній та поперечній вісям та обмотки збудження; L_{ad} – взаємна індуктивність будь-якої пари контурів по поздовжній вісі; J – момент інерції СГ; L_ξ – приріст моменту імпульсу СГ; M_m – момент ДД; $M_{kp\xi}$ – приріст крутного моменту, що діє на ротор СГ; τ – механічна стала ДГ.

Стійкість двоконтурної системи дизель-генератора. Для більшості лінійних моделей синхронних генераторів корені характеристичного рівняння передатної функції знаходяться у явно виражених областях низьких (повільний перехідний процес у механічній частині дизельного двигуна), середніх та високих частот (швидкий перехідний процес в обмотці збудження) [4, 5]. Так, для синхронного генератора типу ЕСО 3-1 L/4 фірми Месс Alte Spa корені характеристичного рівняння приймають наступні значення: $p_1 = -0,5$, $p_2 = -2,869$, $p_{3,4} = -6,824 \pm j318,145$, $p_5 = -244,199$. Це дозволяє перейти до більш спрощених передатних функцій, які відповідають окремим областям частот, що в декілька разів скорочує трудомісткість розрахунків. Структурні схеми дизель-генератора в областях низьких та високих частот наведено на рис. 2, а, б. Наявність демпферної обмотки в синхронних генераторах забезпечує затухання коливань ротора, які виникають у перехідних процесах в області **середніх частот** при різких змінах режиму роботи.

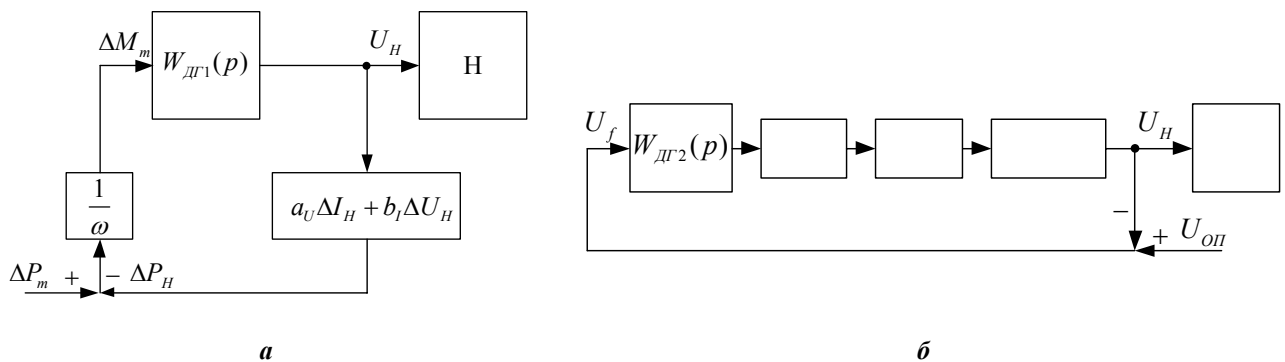


Рис. 2

В області **низьких частот** дизель-генератор представляється моделлю першого порядку з елементом запізнення, який визначається механічною системою подачі палива, що погіршує умови стійкості. Система дизельний двигун–синхронний генератор з передатною функцією $W_{ДГ1}(p) = \left[K_{ДГ1} / (T_{ДГ1} p + 1) \right] \cdot e^{-p\tau}$, де $K_{ДГ1}$, $T_{ДГ1}$ – еквівалентний коефіцієнт підсилення та стала часу дизель-генератора в області низьких частот; τ – величина запізнення, яка буде стійкою за умови, що $\tau < \tau_{кр}$, де $\tau_{кр}$ – величина критичного запізнення,

$$\tau_{кр} = T_{ДГ1} \left[\left(\pi - \arctg \sqrt{K_{ДГ1}^2 - 1} \right) / \sqrt{K_{ДГ1}^2 - 1} \right].$$

В області **високих частот** керування у колі обмотки збудження здійснюється за допомогою ШПІ, який представляється ланкою з передатною функцією $W_{ш}(p)$, безінерційною ланкою з коефіцієнтом підсилення $K_{ш}$

та елементом запізнення. Умова стійкості дизель-генератора з передавальною функцією $W_{дг2}(p) = K_{дг2} / (T_{дг2}p + 1)$, де $K_{дг2}$, $T_{дг2}$ – еквівалентний коефіцієнт підсилення та стала часу дизель-генератора в області високих частот, має вигляд: $T_{дг2} < 2(\tau_L^* + \tau_C)$, де $\tau_L^* = \tau_L^H / K_{ш}$ – приведена стала часу перехідного процесу в RL -контурі ШП; $\tau_L^H = L/R_H$ – стала часу перехідного процесу в R_HL -контурі; $\tau_C = CR_H$ – стала часу перехідного процесу у RC -контурі перетворювача. Тобто для стійкості дизель-генератора в області високих частот необхідно, щоб період комутації ШП був менший за подвійну суму сталих часу τ_L^* та τ_C .

Висновок. Таким чином, представлення дизель-генератора окремими моделями в областях низьких та високих частот дозволяє отримати більш прості вирази для умов стійкості системи електроживлення за рахунок зниження порядку рівнянь вихідної моделі з п'ятого до другого та третього.

1. Блинов И.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко А.В., Киселева А.Г., Лукьяненко Л.Н., Осипенко Е.С., Павловский В.В., Парус Е.В., Сопель М.Ф., Стелюк А.О., Танкевич С.Е. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014. – 408 с.

2. Шитилло В.П., Булатов О.Г. Расчет полупроводниковых систем управления вентильными преобразователями. – М.: Энергия, 1966 – 144 с.

3. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам. Том 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

4. Коришунов В.Н., Усольцев В.К. Математическая модель синхронного генератора с широтно-импульсным модулятором в системе возбуждения // Вологодские чтения. – 2008. – № 69. – С. 134–137.

5. MoIenaag D.P., Bosgra O.H., Hooijmakers M.J. Identification of synchronous generator transfer functions from standstill test data // 2002 ASME wind energy symposium. – New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics. – Pp. 331–339.

УДК 621.314

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА В ОТДЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ ЧАСТОТ

Е.С. Осипенко, В.Я. Жуйков, докт. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

e-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

Представлена упрощенная структурная схема системы электропитания с дизель-генератором, процессы в которой описываются системой уравнений Парка-Горева. Приведены структурные схемы и передаточные функции дизель-генератора в областях низких, средних и высоких частот. Показано, что представление дизель-генератора отдельными моделями в указанных областях частот позволяет снизить порядок уравнений исходной модели и определить соответствующие условия устойчивости по упрощенным соотношениям. Библи. 5, рис. 2.

Ключевые слова: система электропитания, распределенная генерация, дизель-генератор, устойчивость.

THE TRANSFER FUNCTIONS OF THE DIESEL GENERATOR IN SEPARATE FREQUENCY RANGES

K.S. Osypenko, V.J. Zhuikov

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

e-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

The simplified block diagram of power supply circuit with diesel generator, processes in which are described with processes the Park-Gorev equations is given. The block diagrams and transfer functions of the diesel generator in the low, medium and high frequency ranges are given. The conditions of stability of a diesel generator as part of the power supply system with distributed generation are studied. It is shown that the diesel generator presentation with separate models in the indicated frequency ranges reduces the order of the original model equations and allows defining corresponding stability conditions with simplified ratios. References 5, figures 2.

Keywords: power supply system, distributed generation, diesel generator, stability.

1. Blynov I.V., Denysiuk S.P., Zhuikov V.Ya., Kirilenko A.V., Kiseleva A.H., Lukianenko L.N., Osypenko E.S., Pavlovskyy V.V., Parus E.V., Sopol M.F., Stelyuk A.O., Tankevych S.E. Intelligent power systems: elements and modes. – Kyiv: Institut Elektrodinamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2014. – 408 p. (Rus)

2. Shypyllo V.P., Bulatov O.H. The calculation of valve converters semiconductor control systems. – Moskva: Energiia, 1966 – 144 p. (Rus)

3. Kopylov I.P. Guide to electrical machines. Vol. 1. – Moskva: Energoatomizdat, 1988. – 456 p. (Rus)

4. Korshunov V.N., Usoltsev V.K. The mathematical model of synchronous generator with pulse-width modulator in the excitation system // Vologdinskije chteniia. – 2008. – No 69. – Pp. 134–137.

5. MoIenaag D.P., Bosgra O.H., Hooijmakers M.J. Identification of synchronous generator transfer functions from standstill test data // 2002 ASME wind energy symposium. – New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics. – Pp. 331–339.

Надійшла 25.01.2016

Остаточний варіант 30.05.2016