

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.
2. Готман В.И., Маркман Г.З. Обобщенные статические характеристики электроэнергетических подсистем и их коэффициенты крутизны // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 131–134.
3. Готман В.И. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчета установившихся режимов энергосистем // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 134–138.
4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 455 с.
5. Готман В.И., Глазачев А.В. Эквивалентирование энергосистем для оценки статической устойчивости // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 152–155.

Поступила 04.02.2011 г.

УДК 537.1:537.3

РАСШИРЕННЫЙ МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКАХ

Г.В. Носов, Е.О. Кулешова

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@tpu.ru

Приведен расширенный метод эквивалентного генератора при синусоидальных токах, позволяющий определять ток в нагрузке и суммарные активную и реактивную мощности в исходной цепи. Предложена комплексная схема замещения расширенного эквивалентного генератора и даны расчетные формулы определения её параметров при заданном режиме изменения комплексного сопротивления нагрузки и мощностей в исходной цепи.

Ключевые слова:

Метод эквивалентного генератора, активный двухполюсник, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, активная мощность, реактивная мощность, активное сопротивление, реактивное сопротивление.

Key words:

The method of equivalent generator, active dipole, the open circuit voltage, short circuit current, active power, reactive power, resistance, reactance.

При синусоидальных токах и напряжениях для определения в нагрузке линейной исходной цепи комплекса действующего значения тока $\dot{I}_H$ часто применяется метод эквивалентного генератора [1–3], когда вся внешняя к нагрузке цепь как активный двухполюсник заменяется одним эквивалентным генератором с комплексом действующего значения ЭДС $\dot{E}_Г$ и комплексным внутренним сопротивлением $\underline{Z}_Г$ (рис. 1).

В результате ток в нагрузке рассчитывается так

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{E}_Г}{\underline{Z}_Г + \underline{Z}_H}, \quad (1)$$

причем ЭДС $\dot{E}_Г$ равна напряжению холостого хода $\dot{U}_H = \dot{U}_X$ при $\underline{Z}_H = \infty$ и $\dot{I}_H = 0$, а сопротивление $\underline{Z}_Г$ эквивалентного генератора находится с учетом тока короткого замыкания $\dot{I}_H = \dot{I}_K$ при $\underline{Z}_H = 0$ и $\dot{U}_H = 0$:

$$\underline{Z}_Г = \frac{\dot{U}_X}{\dot{I}_K} = R_Г + jX_Г. \quad (2)$$

Однако метод эквивалентного генератора не позволяет определять суммарные с учетом нагрузки значения активной P и реактивной Q мощностей в исходной цепи, которые могут потребоваться, например, для определения оптимального значения сопротивления $\underline{Z}_H$, обеспечивающего

максимальную эффективность передачи η в нагрузку активной энергии:

$$\eta = \frac{P_H}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (3)$$

где $I_H = |\dot{I}_H|$ – действующее значение тока нагрузки; $P_H = I_H^2 R_H$ – активная мощность нагрузки.

Таким образом, актуальность расширения возможностей метода эквивалентного генератора с целью определения мощностей в исходной цепи не вызывает сомнений.

Для этого в схему эквивалентного генератора, рис. 1, введем дополнительное комплексное сопротивление $\underline{Z}_Д = R_Д + jX_Д$, которое совместно с сопротивлениями $\underline{Z}_Г$ и $\underline{Z}_H$ будет задавать мощности P и Q исходной цепи, рис. 2, причем величины $\dot{E}_Г = \dot{U}_X$ и $\underline{Z}_Г = \dot{U}_X / \dot{I}_K$ сохраняют свои значения.

В результате ток будет рассчитываться согласно (1), а сопротивление $\underline{Z}_Д$ найдем из баланса активной P и реактивной мощности Q в схеме рис. 2:

$$\begin{aligned} P &= \frac{U_X^2 \cdot R_Д}{R_Д^2 + X_Д^2} + I_H^2 \cdot (R_Г + R_H); \\ Q &= \frac{U_X^2 \cdot X_Д}{R_Д^2 + X_Д^2} + I_H^2 \cdot (X_Г + X_H), \end{aligned} \quad (4)$$

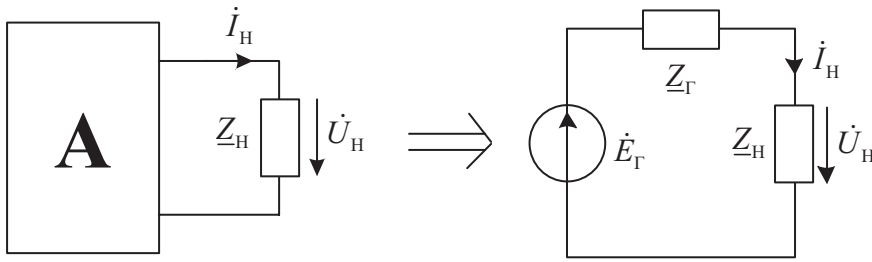


Рис. 1. Комплексная схема замещения эквивалентного генератора: A – активный двухполюсник; $Z_H = R_H + jX_H$ – комплексное сопротивление нагрузки; $\dot{U}_H = I_H Z_H$ – комплекс действующего значения напряжения нагрузки

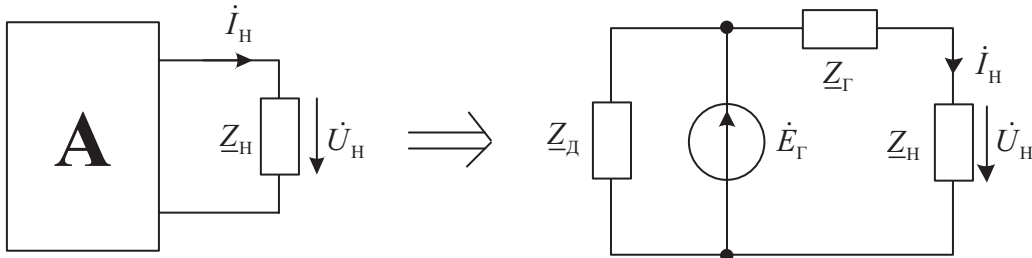


Рис. 2. Комплексная схема замещения расширенного эквивалентного генератора

где $U_x = |\dot{U}_x|$ – действующее значение напряжения холостого хода.

С учетом (1) действующее значение тока нагрузки составит

$$I_H = \frac{U_x}{\sqrt{(R_\Gamma + R_H)^2 + (X_\Gamma + X_H)^2}}, \quad (5)$$

тогда на основании формул (4) и (5) получаем расчетный параметр

$$\lambda = \frac{R_d}{X_d} = \frac{P[(R_\Gamma + R_H)^2 + (X_\Gamma + X_H)^2] - U_x^2(R_\Gamma + R_H)}{Q[(R_\Gamma + R_H)^2 + (X_\Gamma + X_H)^2] - U_x^2(X_\Gamma + X_H)}, \quad (6)$$

реактивную составляющую дополнительного сопротивления

$$X_d = \frac{U_x^2[(R_\Gamma + R_H)^2 + (X_\Gamma + X_H)^2]}{(1 + \lambda^2) \left\{ Q[(R_\Gamma + R_H)^2 + (X_\Gamma + X_H)^2] - U_x^2(X_\Gamma + X_H) \right\}}, \quad (7)$$

активную составляющую дополнительного сопротивления

$$R_d = \lambda X_d. \quad (8)$$

В формулах (6–8) мощности P и Q являются суммарными мощностями в исходной цепи при конкретном значении сопротивления нагрузки $Z_H = R_H + jX_H$. Очевидно, что при изменении сопротивления Z_H будут меняться мощности P , Q и параметры дополнительного сопротивления λ , R_d , X_d . Поэтому из режимов холостого хода и короткого замыкания находим расчетом или экспериментально значения напряжения холостого хода $\dot{U}_H = \dot{U}_x$ и тока короткого замыкания $\dot{I}_H = \dot{I}_k$, по формуле (2) вычисляем сопротивление Z_Γ . При заданном режиме изменения нагрузки для нескольких значений сопротивления Z_H рассчитываем или определяем

экспериментально соответствующие значения мощностей P и Q , а затем вычисляем по формулам (6–8) параметры λ , R_d , X_d . Далее можно проводить исследование в схеме расширенного эквивалентного генератора, рис. 2, с целью нахождения тока (1), мощностей P , Q и эффективности (3). Рассчитанные составляющие дополнительного сопротивления R_d и X_d могут задаваться графически или приближенными аналитическими зависимостями.

Для иллюстрации применения расширенного метода эквивалентного генератора в качестве примера рассмотрим линейную исходную цепь, комплексная схема замещения которой приведена на рис. 3.

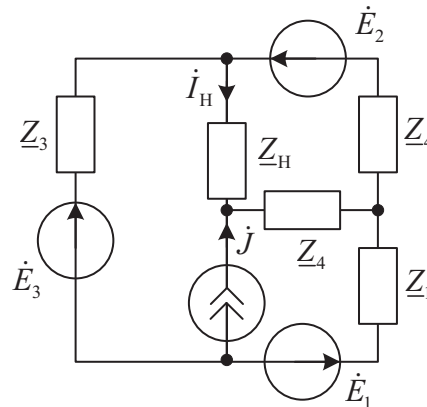


Рис. 3. Комплексная схема замещения исходной цепи с параметрами: $\dot{E}_1 = 100 - j100$, В; $\dot{E}_2 = 100 + j100$, В; $\dot{E}_3 = 300 + j300$, В; $j = 4 - j4$, А; $Z_1 = 100 + j200$, Ом; $Z_2 = 100 - j100$, Ом; $Z_3 = 50 + j50$, Ом; $Z_4 = 50 + j100$, Ом

Из режимов холостого хода ($Z_H = \infty$) и короткого замыкания ($Z_H = 0$) определяем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x &= -935,155 + j241, \text{ В}; \quad U_x = 965,71, \text{ В}; \\ \dot{I}_k &= -3,821 - j1,61, \text{ А}; \quad Z_\Gamma = 185,28 - j141,124, \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Таблица. Параметры расширенного эквивалентного генератора

$Z_H = R_H + jX_H, \text{ Ом}$	$Z_H = Z_H , \text{ Ом}$	$I_H, \text{ А}$	$U_H = Z_H I_H, \text{ В}$	$P, \text{ Вт}$	$Q, \text{ вар}$	$\lambda, -$	$R_d, \text{ Ом}$	$X_d, \text{ Ом}$
∞	∞	0	965,71	3730	-2316	-1,61	180,46	-112,11
$Z_{H1} = 500 - j100$	$Z_{H1} = 509$	1,33	677,92	3574	-731	-7,75	388,17	-50,07
$Z_{H2} = 400 - j50$	$Z_{H2} = 403$	1,57	632,36	3582	-434	59,42	435,17	7,32
$Z_{H3} = 300$	$Z_{H3} = 300$	1,91	573,33	3613	-5	3,61	470,33	130,28
$Z_{H4} = 200 + j50$	$Z_{H4} = 206$	2,44	502,92	3707	663	1,17	381,87	325,36
$Z_{H5} = 100 + j100$	$Z_{H5} = 141$	3,35	473,88	4002	1822	0,35	127,42	363,75
0	0	4,15	0	1979	196	-0,28	-54,24	197,44

Для заданных значений сопротивления нагрузки Z_H в таблице и на рис. 4–9 приведены полученные по формулам (1–8) с использованием системы Mathcad [4] результаты расчета параметров расширенного эквивалентного генератора.

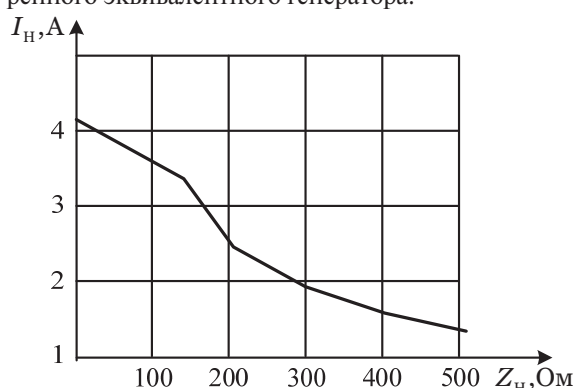


Рис. 4. Зависимость действующего значения тока нагрузки I_H от модуля сопротивления нагрузки $Z_H = |Z_H|$

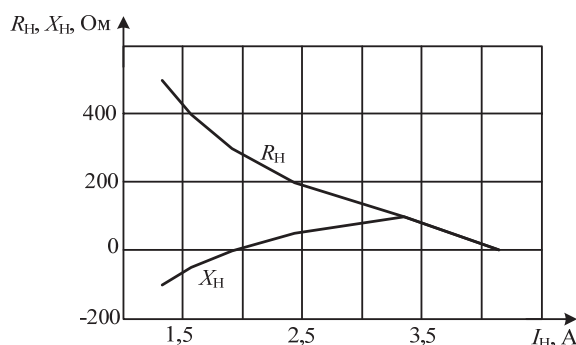


Рис. 5. Зависимости активной R_H и реактивной составляющей X_H сопротивления нагрузки Z_H от действующего значения тока нагрузки I_H

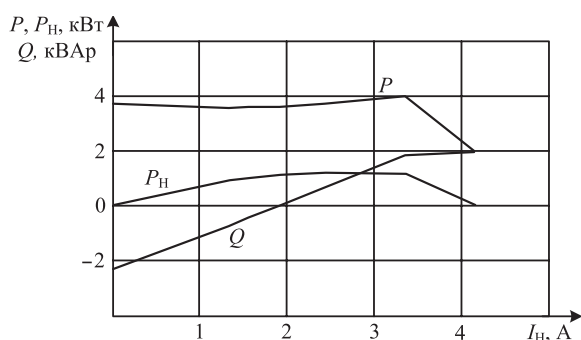


Рис. 6. Зависимости активных мощностей P, P_H и реактивной мощности Q от действующего значения тока нагрузки I_H

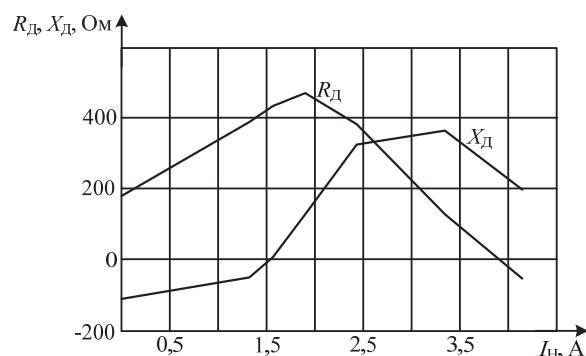


Рис. 7. Зависимости активной R_d и реактивной составляющей X_d дополнительного сопротивления Z_d от действующего значения тока нагрузки I_H

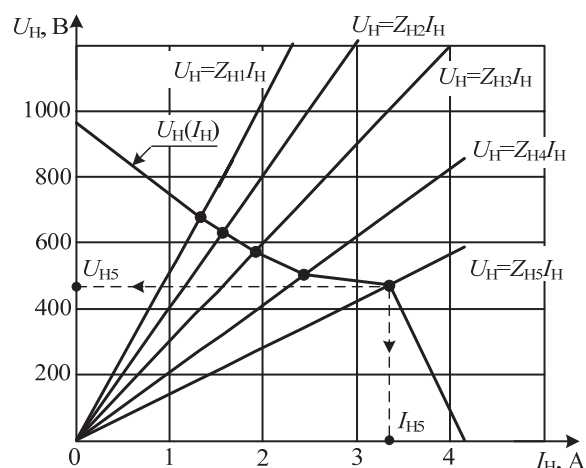


Рис. 8. Зависимости действующего значения напряжения на нагрузке U_H от действующего значения тока нагрузки I_H

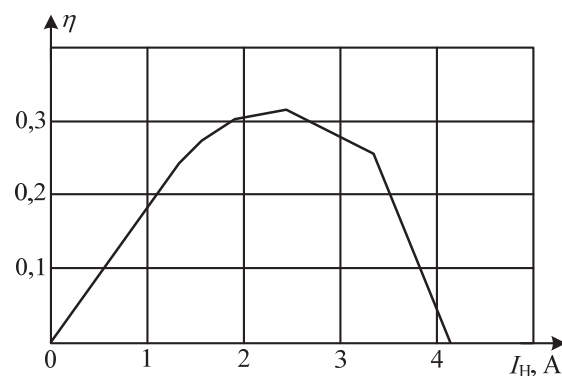


Рис. 9. Зависимость эффективности передачи в нагрузку активной энергии η от действующего значения тока нагрузки I_H

Точки пересечения нелинейной внешней характеристики эквивалентного генератора $U_H(I_H)$ с линейными зависимостями $U_H = Z_{HK} I_K$ позволяют найти действующие значения напряжения U_{HK} и тока I_{HK} нагрузки с фиксированным модулем сопротивления Z_{HK} , рис. 8. Таким образом, для исследованной исходной цепи, рис. 3, максимальная эффективность передачи активной энергии в нагрузку $\eta \approx 0,32$ достигается при действующем значении тока $I_H \approx 2,4$ А, рис. 9. Этот ток будет при оптимальном сопротивлении нагрузки, равном $Z_H \approx Z_{H4} = 200 + j50$ Ом, рис. 5, которое отличается от сопряженного значения сопротивления Z_G , т. е. $Z_{Hmax} = R_G - jX_G = 185,28 + j141,124$ Ом, когда наблюдается максимум активной мощности нагрузки P_H [2]. Следует отметить, что во многих учебниках, например в [2], считают, что при максимуме активной мощности нагрузки эффективность (КПД) передачи активной энергии в нагрузку составляет $\eta \approx 0,5$. Это утверждение неверно для исходной сложной цепи и справедливо лишь для одноконтурной схемы, состоящей из ЭДС источника E_G и сопротивлений Z_G , Z_H .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов Г.В., Кулешова Е.О. Расширенный метод эквивалентного генератора при постоянных токах // Известия Томского политехнического университета. — 2011. — Т. 318. — № 4. — С. 73–75.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — 11-е изд., испр. и доп. — М.: Гардарики, 2007. — 701 с.: ил.

Выводы

1. Предложен расширенный метод эквивалентного генератора при синусоидальных токах, позволяющий определить не только ток и напряжение в нагрузке, но и активную и реактивную мощности в исходной цепи, а также эффективность (КПД) передачи активной энергии от всех источников исходной цепи в нагрузку, что может быть использовано для оптимизации параметров сложных электрических цепей.
2. Расширенный метод эквивалентного генератора дает возможность найти оптимальное комплексное сопротивление нагрузки для получения реального значения максимальной эффективности передачи в нагрузку активной энергии.
3. Для обеспечения заданной активной мощности в исходной линейной цепи величина активной составляющей дополнительного сопротивления может принимать при определенных значениях сопротивления нагрузки отрицательные значения, что свидетельствует о том, что дополнительное сопротивление расширенного эквивалентного генератора является математическим приемом для учета реальных физических процессов в электрических цепях.

3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. — 5-е изд. — СПб.: Питер, 2009. — Т. 1. — 2009. — 512 с.: ил.
4. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке [и др.]. — 5-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
5. Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2000. — 592 с.

Поступила 02.03.2011 г.