

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Вишнеvский Л.В., д-р техн. наук, профессор, Дао Минь Куан
Одесская национальная морская академия

На основании векторных уравнений асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением и анализа корней характеристического уравнения получена передаточная функция асинхронного генератора по каналу управления.

On the basis of vector equations of an asynchronous generator with capacitor excitation and analysis of the roots of the characteristic equation obtained by the transfer function of an asynchronous generator control channel.

Ключевые слова: асинхронный генератор, передаточная функция.

Автоматизация генераторных установок с асинхронным генератором с конденсаторным возбуждением методами теории автоматического управления предполагает знание его передаточных функций по каналам управления и нагрузки. Аналитическое исследование переходных процессов в асинхронном генераторе описано в работах [1, 2]. Здесь получены выражения для корней характеристического уравнения и переходные характеристики генератора, приведена методика определения показателя затухания (нарастания) колебаний напряжения генератора.

Представим зависимости между напряжением асинхронного генератора и проводимостью конденсаторов возбуждения и нагрузки в виде передаточной функции.

Мгновенное значение переменного напряжения в статорной обмотке может быть представлено проекцией обобщенного вектора напряжения на направление электрической оси обмотки [1]. При этом амплитуда переменного напряжения равна модулю вектора напряжения. Поэтому для математического описания динамических характеристик асинхронного генератора как объекта управления напряжением будем рассматривать изменение модуля вектора напряжения во времени при изменениях параметров нагрузки и возбуждения. Уравнения для напряжения \bar{U}_s , токов \bar{I}_s, \bar{I}_r статорной и роторной цепей генератора и связанных с ними потокосцеплений $\bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_r$ имеют следующий вид [1]:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s + p\bar{\Psi}_s + j\omega_s\bar{\Psi}_s + r_s\bar{I}_s = 0, \quad p\bar{\Psi}_r + j(\omega_s - \omega_r)\bar{\Psi}_r + r_r\bar{I}_r = 0 \\ \bar{\Psi}_s = (L_{s\sigma} + L_m)\bar{I}_s + L_m\bar{I}_r, \quad \bar{\Psi}_r = L_m\bar{I}_s + (L_{r\sigma} + L_m)\bar{I}_r. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь r_s, r_r – сопротивления статора и ротора; L_m – индуктивность контура намагничивания; $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – индуктивности рассеяния статора и ротора.

Уравнение нагрузки и возбуждения генератора запишем для параллельного соединения активной нагрузки с проводимостью g , дросселя с индуктивностью L и сопротивлением r , а также конденсатора емкостью C .

$$\bar{I}_s = \left[g + \frac{1}{r + (p + j\omega_s)L} + (p + j\omega_s)C \right] \bar{U}_s. \quad (2)$$

Решение системы уравнений (1) позволяет определить статорный ток генератора:

$$\bar{I}_s = - \frac{\bar{U}_s (p + js\omega_s + \alpha_r)}{\sigma L_s [(p + j\omega_s)(p + js\omega_s) + (p + j\omega_s)\alpha_r' + (p + js\omega_s)\alpha_s' + \alpha_s\alpha_r']}. \quad (3)$$

Здесь использованы следующие общепринятые обозначения [4]: $\sigma = (L_s L_r - L_m^2) / L_s L_r$ – коэффициент рассеяния; L_s, L_r – индуктивности статора и ротора; $\alpha_r = r_r / L_r$, $\alpha_s = r_s / L_s$, – коэффициенты затухания обмоток ротора и статора при разомкнутых цепях статора и ротора соответственно; $\alpha_r' = \alpha_r / \sigma$, $\alpha_s' = \alpha_s / \sigma$ – то же при замкнутом статоре и роторе; $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ – скольжение.

Исключая ток \bar{I}_s из уравнений (2) и (3) получим характеристическое уравнение с комплексными коэффициентами, описывающее режим возбуждения генератора, которое при активно-емкостной нагрузке имеет вид:

$$(p + j\omega_s) + \alpha_n + \frac{1}{\sigma L_s C} \cdot \frac{(p + js\omega_s + \alpha_r)}{(p + j\omega_s)(p + js\omega_s) + (p + j\omega_s)\alpha'_r + (p + js\omega_s)\alpha'_s + \alpha_s\alpha'_r} = 0. \quad (4)$$

Здесь $\alpha_n = g / C$ – коэффициент затухания активно-емкостной нагрузки.

Корни характеристического уравнения (4) позволяют оценить динамические свойства асинхронного генератора. Определим величину корня p_1 из уравнения, пренебрегая скольжением и слагаемыми второго порядка малости:

$$p_1 = -\alpha'_r \cdot \frac{\frac{1}{L_s C} - \omega_s^2 (1 + \frac{s(\alpha'_s + \alpha_n)}{\alpha'_r})}{\frac{1}{C(L_{s\sigma} + L_{r\sigma})} - \omega_s^2 + \alpha_n(\alpha'_s + \alpha'_r)} \approx r_r \omega_s [\omega_s C - \frac{1}{L_s \omega_s} - g^2(L_{s\sigma} + L_{r\sigma})\omega_s - gr_s C\omega_s] \approx r_r \omega_s (b_c - b_g). \quad (5)$$

Здесь $b_c = \omega_s C$ – проводимость конденсаторов возбуждения, $b_g = \frac{1}{L_s \omega_s} + g^2(L_{s\sigma} + L_{r\sigma})\omega_s + gr_s C\omega_s$ – индуктивная проводимость асинхронного генератора с учетом размагничивающего действия нагрузки.

Остальные два корня уравнения (4) равны:

$$p_2 \approx -\frac{1}{2}[\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r(1 + \omega_s / \omega_k)] + j(\omega_k - \omega_s), \quad p_3 \approx -\frac{1}{2}[\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r(1 - \omega_s / \omega_k)] - j(\omega_k - \omega_s). \quad (6)$$

где $\omega_k = \frac{1}{\sigma L_s C} - \omega_s^2 (s - \frac{s^2}{4}) - \frac{1}{4}(\alpha_n - \alpha'_s - \alpha'_r)^2 + \alpha'_s \alpha'_r \approx \frac{1}{C(L_{s\sigma} + L_{r\sigma})}$ – частота затухания токов рассеяния статора и ротора.

Физический смысл корней p_2 и p_3 заключается в том, что они характеризуют изменение энергии, запасенной в полях рассеяния статора и ротора. Интенсивность затухания этих процессов определяется действительными частями корней и существенно зависит от нагрузки генератора. Действительная часть корней (6) на холостом ходу почти на порядок меньше, чем при номинальной нагрузке. При сбросе нагрузки наблюдаются колебания вектора напряжения с частотой ω_k , затухающие в течение одного - двух периодов генерируемого тока, а при подключении номинальной нагрузки этот процесс становится практически апериодическим и заканчивается за четверть периода. Этот факт подтверждается результатами эксперимента и моделирования на ЭВМ, рис. 1, рис. 2.

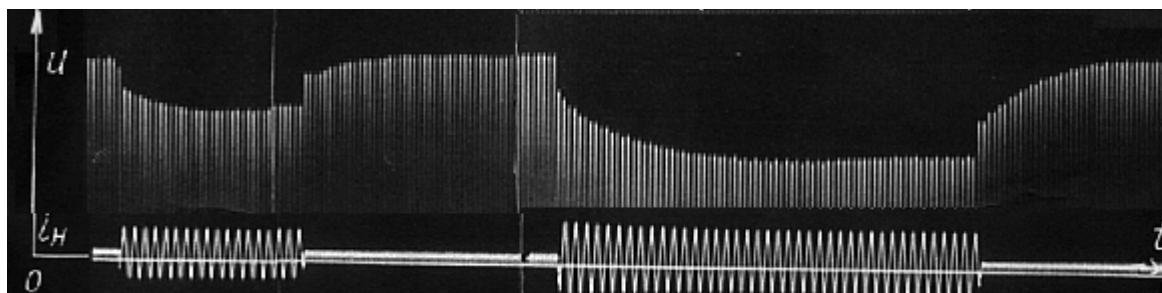


Рис. 1 – Экспериментальные переходные процессы в асинхронном генераторе при включении и отключении нагрузки

Корням характеристического уравнения (5) и (6) соответствуют векторные слагаемые общего решения дифференциального уравнения, описывающего режим самовозбуждения асинхронного генератора. При изменении параметров асинхронного генератора возникает переходный процесс, который можно представить тремя векторами, записанными в неподвижной системе координат:

$$\bar{U}_s = \bar{U}_1 e^{r_r \omega_s (b_c - b_g)t} e^{j\omega_s t} + \bar{U}_2 e^{-\frac{1}{2}(\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r)t} e^{j\omega_k t} + \bar{U}_3 e^{-\frac{1}{2}(\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r)t} e^{-j\omega_k t}. \quad (7)$$

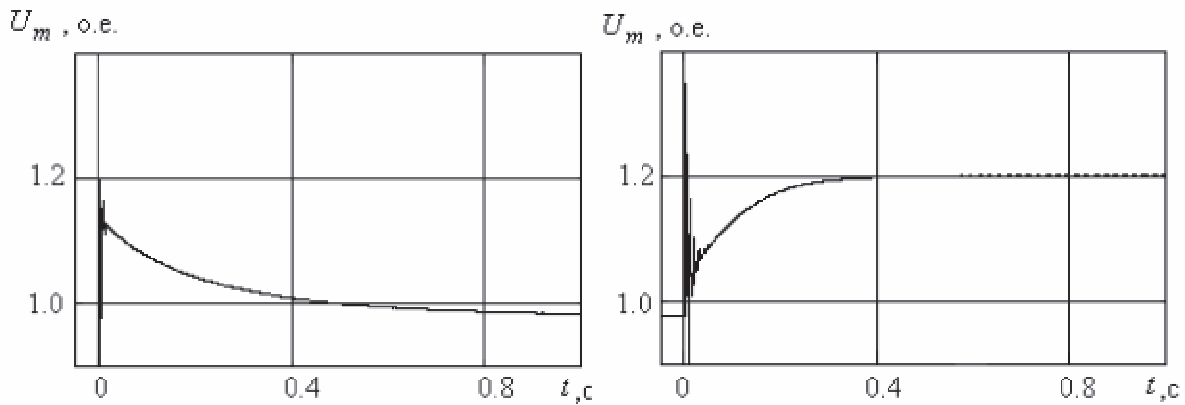


Рис. 2 – Моделирование переходных процессов в асинхронном генераторе при включении и выключении нагрузки

Каждый вектор уравнения (7) вращается со своей частотой и затухает со скоростью, равной действительной части соответствующего корня характеристического уравнения. В переходном процессе слагаемые уравнения (7) отражают определенные физические явления. Первое описывает самовозбуждение, при котором изменяется проводимость генератора b_g до тех пор, пока затухание этого слагаемого не станет равным нулю, т.е. $b_c - b_g = 0$. При $t \rightarrow \infty$ вектор $\bar{U}_1 e^{j\omega_s t}$ вращается относительно обмоток статора с частотой ω_s и описывает новый установившийся режим генератора. Второе и третье слагаемые уравнения (7) имеют примерно одинаковое затухание $\alpha_\sigma = (\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r) / 2$ и вращаются в противоположные стороны с частотой ω_k , равной собственной частоте колебательного контура, образованного емкостью возбуждения и индуктивностями рассеяния статора и ротора. Эти слагаемые уравнения (7) отражают процесс рассеяния энергии, запасенной в индуктивностях рассеяния генератора.

Процесс самовозбуждения асинхронного генератора описывается корнем p_1 . Декремент затухания первого слагаемого уравнения (7) зависит от разности проводимостей конденсаторов b_c и генератора b_g . В свою очередь проводимость генератора определяется его насыщением, т.е. зависит от величины напряжения.

Эта зависимость для серийных асинхронных машин типов 4А, АИР и др. имеет характерную особенность: при напряжении до $(0,6...0,7)U_{ном}$ индуктивность главного контура машины практически постоянна, а при напряжении $(0,9...1,3)U_{ном}$ проводимость b_g линейно увеличивается при возрастании напряжения. Поэтому в ненасыщенном и в насыщенном состоянии переходный процесс самовозбуждения происходит по-разному. При малых напряжениях при небалансе реактивных проводимостей $b_c \neq b_g$ их разность остается постоянной, скорость самовозбуждения также постоянна и пропорциональна этой разности. При насыщении генератора возникает отрицательная обратная связь между напряжением и проводимостью генератора, что делает процесс самовозбуждения апериодическим, см. рис. 1, рис. 2.

Рассмотрим процесс самовозбуждения генератора в отклонениях амплитуды напряжения ΔU и проводимостей Δb_c и Δb_g . Исходя из значения корня характеристического уравнения p_1 , получаем, что скорость изменения напряжения пропорциональна разности проводимостей $\frac{d\Delta U}{dt} = r_r \omega_s (\Delta b_c - \Delta b_g)$. На насыщенном участке прирост напряжения пропорционален увеличению проводимости: $\Delta U = k_{ub} \Delta b_g$. Исключив Δb_g , получим передаточную функцию асинхронного генератора по каналу "возбуждение - огибающая напряжения", вызванную самовозбуждением:

$$W_g = \frac{\Delta U}{\Delta b_c} = \frac{k_{ub}}{\frac{k_{ub} p}{r_r \omega_s} + 1} = \frac{k_{ub}}{T_g p + 1} \quad (8)$$

W_g представляє собою аперіодическе звено першого порядку. На лінійному участку кривої намагнічування $k_{ub} \rightarrow \infty$, а передаточна функція равна $W_g = r_r \omega_s / p$ і представляє собою інтегруюче звено.

Такое упрощенное описание переходного процесса самовозбуждения хорошо согласуется с экспериментами. При малых напряжениях асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением напряжение увеличивается линейно, а при достижении насыщенного участка дальнейшее его нарастание происходит экспоненциально.

Особенностью переходного процесса в асинхронном генераторе является то, что он складывается из двух существенно различных по времени протекания процессов. Во-первых, быстрого затухания процессов рассеяния при медленно меняющемся магнитном потоке в зазоре машины. Во-вторых, медленно изменения главного потока намагничивания, вызванного небалансом реактивных проводимостей конденсаторов и генератора, длительность которого достигает 50 ... 70 периодов генерируемого тока. Первый процесс описывается вторым и третьим слагаемыми, а второй — первым слагаемым уравнения (7). Передаточная функция, связанная с затуханием в контурах рассеяния W_σ , может быть представлена колебательным звеном второго порядка, характеристическое уравнение которого имеет два комплексно сопряженных корня $p_{2,3} = -\frac{1}{2}(\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r) \pm j\omega_k$:

$$W_\sigma = \frac{k_\sigma}{T_\sigma^2 p^2 + 2\alpha_\sigma T_\sigma^2 p + 1}, \quad (9)$$

где $T_\sigma = \sqrt{\frac{1}{\alpha_\sigma^2 + \omega_k^2}}$ — постоянная времени затухания, $\alpha_\sigma = (\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r) / 2$ — декремент затухания в контурах рассеяния.

Как отмечалось выше, процессы возбуждения и рассеяния несоизмеримы по времени, поэтому передаточная функция W_σ в сумме с W_g может рассматриваться как пропорциональное звено с коэффициентом k_σ .

$$W_{ub} = W_g + W_\sigma = \frac{k_{ub}}{T_g p + 1} + k_\sigma. \quad (10)$$

Численные значения коэффициентов передачи и постоянной времени при экспериментальном исследовании и при моделировании практически совпадают с результатами, полученными аналитически. Погрешность не превышает 5 %.

Литература

1. Ковач К., Рац П. Переходные процессы в машинах переменного тока. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 744 с.
2. Вишневский Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами. — Киев — Одесса: Лыбидь, 1990. — 168 с.

УДК 004.738.5

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Деркунская В.О., аспирант, Доронина Ю.В., канд. техн. наук, доцент
Севастопольский национальный технический университет

В данной работе рассматривается устройство системы прогноза погоды, предлагаются методы по автоматизации системы сбора данных, а также затрагивается проблемы анализа данных и прогноза погоды на их основе. Все заключения базируются на аппарате нечеткой логики, который в последнее время пользуется популярностью в системах адаптивного управления.