

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС В АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЕ

Мишин В.И., д.т.н., проф., Каплун В.В., к.т.н., доц., Макаревич С.С.
 Национальный аграрный университет
 Украина, 03041, Киев, ул. Героев обороны, 12
 тел. (044) 527-87-57

Наведена методика розрахунку характеристик асинхронного електромеханічного комплексу на базі компенсованих асинхронних машин в автономній системі, яка задовольняє будь-яким частковим випадкам сумісної роботи асинхронного генератора і асинхронного двигуна

Приведена обобщённая методика расчета характеристик асинхронного электромеханического комплекса на базе компенсированных асинхронных машин в автономной системе, которая удовлетворяет любым частным случаям совместной работы асинхронного генератора и асинхронного двигателя.

Принцип создания и действия компенсированных асинхронных машин (КАМ), особенности их конструкции и физических процессов, условия и возможности повышения эффективности представлены в ряде публикаций, в том числе [1, 2, 8].

Напомним лишь, что компенсированной называется асинхронную машину (АМ) с внутренней ёмкостной компенсацией реактивной мощности. При реализации одного из наиболее эффективных способов такой компенсации обмотка статора машины выполнена из двух одинаковых частей, пространственно смещённых относительно друг друга на некоторый угол Θ . Обычно угол Θ принимается $+30^\circ$ (в двигателях) или -30° (в генераторах), что легко осуществляется делением фазной зоны трёхфазной обмотки статора на две равные части). Обмотки статора, являясь обычными рабочими для АМ, соединяются по схеме поворотного автотрансформатора (АТ) на электрическую ёмкость C_Δ , ток которой I_Δ становится одновременно и током вторичной обмотки АТ. Электромагнитной связью с другими обмотками статора и ротора он создаёт в них дополнительные ЭДС $\dot{E}_{\Delta m} = -jx_m \dot{I}_\Delta$, которые перераспределяют токи и мощности между обмотками, изменяют фазы токов, их величины и т.п.

Шунтирование вторичной обмотки АТ дополнительной ёмкостью C_k усиливает эти эффекты. Компенсированная асинхронная машина с ёмкостью на выходе АТ и при шунтировании дополнительной ёмкостью вторичной обмотки АТ в определённой мере является обобщённой, так как при вариациях вносимых параметров (электрических ёмкостей) и размещения обмоток статора (изменения угла Θ) могут быть получены различные модификации КАМ, включая базовые серийные машины [3, 4, 5].

Во всех модификациях автономных асинхронных генераторов (ААГ) может быть использована и ёмкость C , включенная параллельно нагрузке на выходе генератора. Она служит для компенсации реактивной мощности нагрузки и частично (в компенсированном автономном асинхронном генераторе (КААГ)) или полностью (в автономном асинхронном генераторе (ААГ)) для возбуждения генератора).

В компенсированном асинхронном двигателе (КАД) [1] внутренняя ёмкостная компенсация снижает реактивные, а следовательно, и рабочие токи обмоток, потери электроэнергии в них, повышает внутренний $\cos\varphi$. Двигатель становится энергосберегаю-

щим, регулируемым по величине реактивной мощности, $\cos\varphi$, пусковых тока и момента.

В компенсированном автономном асинхронном генераторе [2] повышается степень жёсткости внешних характеристик (практически до стабилизации напряжения и частоты) с ростом нагрузки в пределах до номинальной, значительно увеличивается перегрузочная способность, достигается приемлемый уровень напряжения, что определяет возможность запуска от генератора асинхронного двигателя соизмеримой и даже одинаковой с ним базовой мощности.

В данной работе предлагается инженерная методика расчёта характеристик компенсированных асинхронных машин электромеханического комплекса в виде генератора и двигателя автономной системы в симметричном режиме установившегося или квазистановившегося процесса.

Вначале рассмотрим работу обобщённого компенсированного автономного асинхронного генератора (ОКААГ) на симметричную нагрузку, заданную в виде сопротивления $Z_n = r_n + jx_n = \text{var}$ при $\cos\varphi_n = \text{const}$. ОКААГ с двумя внутренними C_Δ и C_k ёмкостями и одной внешней C обладает максимальной возможностью воздействия на характеристики как самого генератора так и всей автономной электромеханической системы. В соответствии с электрической схемой ОКААГ (рис. 1а) расчётные уравнения электрического равновесия составляются для трёх основных (две обмотки статора и одна ротора) и одного дополнительного (шунтирование ёмкостью C_k вторичной обмотки АТ) контуров электрической цепи фазы:

$$\left. \begin{aligned} 1. \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jx_1 \cos\Theta \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{I} \cdot Z, \\ 2. \dot{U}_1 &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cos\Theta \cdot \dot{I}_1 - \dot{U}_{c\Delta}, \\ 3. \dot{U}_\Delta &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cos\Theta \cdot \dot{I}_1 = -jx_{ck} \dot{I}_{ck} \\ 4. 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2/S + jx_2). \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где \dot{U}_1 - напряжение на выходе генератора, $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}) = -jx_m \dot{I}_0$ - ЭДС основной обмотки статора и приведённой к ней обмотки ротора, $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\Theta}$ - ЭДС дополнительной (вторичной для АТ) обмотки статора, \dot{U}_Δ - её напряжение, $\dot{U}_{c\Delta} = -jx_{c\Delta} \cdot \dot{I}_{c\Delta}$ - напряжение на выходе АТ (на ёмкости C_Δ); $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}$ - намагничивающий

ток по отношению к основной ЭДС \dot{E}_1 , \dot{I}_1 , \dot{I}_Δ , \dot{I}_2 - токи соответственно основной, дополнительной обмотки статора и ротора, $\dot{I}_{c\Delta}$, \dot{I}_{ck} , \dot{I}_c - токи в электрических ёмкостях, соответственно C_Δ , C_k , C , с сопротивлениями $x_{c\Delta}$, x_{ck} , x_c , причём $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta - \dot{I}_{ck} = \dot{I}_H + \dot{I}_c$ - общий ток генератора, \dot{I}_H - ток нагрузки, $Z_1 = r_1 + jx_1$ - сопротивление ветви обмотки статора, r_1 - активное, x_1 - реактивное сопротивление рассеяния ветви, $Z_1 = Z_\Delta$, $x_1 \cos \Theta$ - реактивное сопротивление взаимной индукции по полю рассеяния между ветвями обмоток собственной фазы,

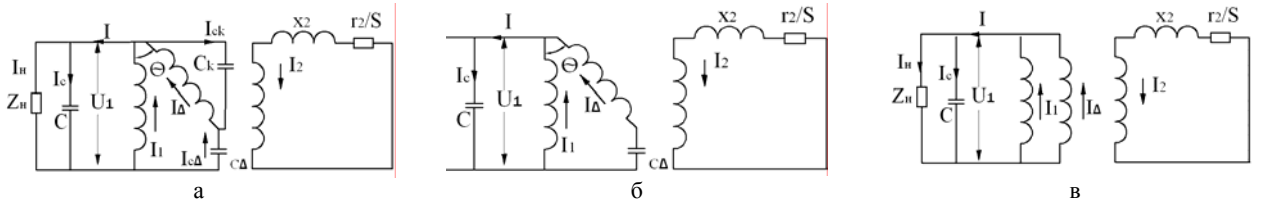


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы фазы модификаций автономного асинхронного генератора (ААГ) при работе на статическую нагрузку Z_H : а - обобщённый компенсированный автономный генератор (ОКААГ) при $x_{c\Delta} \neq 0$, $x_{ck} \neq 0$; $x_c \neq 0$; $\Theta \neq 0$; $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta} + \dot{I}_{ck}$, б - компенсированный автономный генератор (КААГ) при $x_{ck} = \infty$, $\dot{I}_{ck} = 0$, $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta}$, $x_{c\Delta} \neq 0$, $\Theta \neq 0$, в - автономный асинхронный генератор (ААГ) на базе серийной асинхронной машины; при $x_{c\Delta} = 0$, $\Theta = 0$, $\dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta$

Основным энергетическим параметром автономного генератора в системе уравнений (1) является основная ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$, относительно которой и нужно выразить уравнения электрического равновесия двух главных контуров цепи статора с токами \dot{I}_1 и \dot{I}_Δ . При этом напряжение \dot{U}_1 на выходе генератора является искомой величиной и представляется как $\dot{U}_1 = \dot{I}Z$, ток дополнительной ёмкости из (1-3) равен

$$\dot{I}_{ck} = j \frac{\dot{E}_1 e^{j\Theta} - \dot{I}_\Delta Z_1 - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_1}{x_{ck}}.$$

При этих условиях первые два уравнения (1 - 1,2) статорной цепи выразятся в виде

$$\begin{aligned} 1) a\dot{E}_1 &= b\dot{I}_1 + c\dot{I}_\Delta; \\ 2) d\dot{E}_1 &= e\dot{I}_1 + f\dot{I}_\Delta, \end{aligned} \quad (3)$$

где параметрические коэффициенты равны

$$\begin{aligned} a &= 1 + j \frac{Z}{x_{ck}} e^{j\Theta}; \quad b = Z_1 + Z \left(1 - \frac{x_1 \cos \Theta}{x_{ck}} \right); \\ c &= Z \left(1 + j \frac{Z_1}{x_{ck}} \right) + jx_1 \cos \Theta; \quad d = \left(1 + \frac{x_{c\Delta} + jZ}{x_{ck}} \right) e^{j\Theta}; \\ e &= Z + jx_1 \cos \Theta \left(1 + \frac{x_{c\Delta} + jZ}{x_{ck}} \right); \\ f &= Z_1 + \left(1 + \frac{x_{c\Delta} + jZ}{x_{ck}} \right) - jx_{c\Delta} + Z, \quad k_c = 1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}} \end{aligned} \quad (4)$$

Решением системы уравнений (3) токи обмоток статора представляются в виде

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_1 \cdot \gamma, \quad \dot{I}_\Delta = \dot{E}_1 \cdot \Delta$$

при

x_m - главное реактивное сопротивление обмоток, взаимноиндуктивной связи между ними. $Z = \frac{-jx_c \cdot Z'_H}{Z_H - jx_c} - r + jx$ - общее сопротивление нагрузки и ёмкости "С", его составляющие

$$r = \frac{x_c^2 r_H}{r_H^2 + (x_H - x_c)^2}, \quad x = -x_c \frac{r_H^2 - x_H x_c + x_H^2}{r_H^2 + (x_H - x_c)^2}, \quad (2)$$

$e^{j\Theta}$, $e^{-j\Theta}$ - поворотные множители, как коэффициенты приведения ЭДС, токов к оси соответствующей обмотки статора.

$$\begin{aligned} \gamma &\approx \frac{a \cdot f - c \cdot d}{b \cdot f - c \cdot e} \approx \frac{Z_1 k_c + Z \left(1 + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right) - Z e^{j\Theta} - jx_{c\Delta}}{(Z_1 k_c - jx_{c\Delta}) \cdot (Z_1 + Z) + Z_1 Z \left(1 + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right)}, \\ \Delta &\approx \frac{b \cdot d - a \cdot e}{b \cdot f - c \cdot e} \approx \frac{-Z + Z e^{j\Theta} \left(k_c + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right) + Z_1 k_c e^{j\Theta}}{(Z_1 k_c - jx_{c\Delta}) \cdot (Z_1 + Z) + Z_1 Z \left(1 + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right)} \end{aligned} \quad (5)$$

С целью некоторого упрощения выражений (5) значения γ и Δ определены без учёта поля рассеяния между полуобмотками фазы, то есть при $x_1 \cos \Theta = 0$.

Определяют также $\gamma + \Delta e^{-j\Theta} = \alpha = \alpha_a + j\alpha_i$ разделяя параметрический комплекс α на действительную и мнимую составляющие α_a и $j\alpha_i$.

Из условия электрического равновесия МДС и электромагнитных мощностей системы связь между токами её представляется равенством

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2, \quad (6)$$

где все токи могут быть выражены через основную ЭДС E_1 и параметры цепи как

$$\dot{I}_1 = \gamma \cdot \dot{E}_1, \quad \dot{I}_\Delta = \Delta \cdot \dot{E}_1, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1}{(r_2/S) + jx_2}, \quad \dot{I}_0 = j \frac{\dot{E}_1}{x_m}. \quad (7)$$

При подстановке (7) в (6) и сокращении на \dot{E}_1 получают уравнения равновесия параметров системы "автономный генератор - нагрузка" в виде

$$\alpha = \gamma + \Delta e^{-j\Theta} = \frac{j}{x_m} - \frac{1}{r_2/S + jx_2} \quad \text{или}$$

$$\frac{2(Z_1 k_c - Z \cos \Theta) + Z \left(1 + k_c + \frac{j2Z_1}{x_{ck}} \right) - jx_{c\Delta}}{(Z_1 k_c - jx_{c\Delta}) \cdot (Z_1 + Z) + Z_1 Z \left(1 + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right)} \approx \frac{j}{x_m} - \frac{1}{Z_2}. \quad (8)$$

Левая часть равенства (8) определяется собственными ($Z_1 = r_1 + jx_1$; Θ) и вносимыми ($x_{c\Delta}$, x_{ck} , Z) параметрами машины и представляет комплекс $\alpha = \alpha_a + j\alpha_i$; в правую часть входят сопротивления контура ротора $Z_2 = r_2/S + jx_2$ и намагничивающего контура x_m .

Разделив равенство (8) на действительные и мнимые составляющие из условия баланса действительных частей

$$\alpha_a = \frac{-r_2/S}{(r_2/S)^2 + x_2^2} \quad (9a)$$

находят r_2/S и S , а по балансу реактивных составляющих

$$\alpha_i = \frac{1}{x_m} + \frac{x_2}{(r_2/S)^2 + x_2^2} \quad (9б)$$

определяют x_m , удовлетворяющие заданной нагрузке и всем параметрам генератора.

Используя кривую намагничивания [5, 6] асинхронной машины по величине x_m находят ЭДС E_1 .

Располагая вектор $\dot{E}_1 = E_1$ по оси действительных чисел комплексной системы координат, принимают действительные и мнимые части комплексных токов и сопротивлений равными соответственно их активным и реактивным составляющим. По (7) определяют комплексные значения основных токов ОКААГ, затем другие величины, необходимые для расчёта и построения его характеристик.

Представленная система уравнений (1) и методика её расчёта для обобщённого компенсированного асинхронного генератора действительны и для других модификаций компенсированных автономных асинхронных генераторов (КААГ). Так возможен вариант расчёта КААГ при ёмкости $C = 0$ при $Z = Z_H$, $x_{c\Delta} \neq 0$, $x_{ck} \neq 0$. При исключении ёмкости C_k , шунтирующей вторичную обмотку АТ (рис. 1б) КААГ, кроме внешней ёмкости C , имеет только одну внутреннюю ёмкость C_Δ на выходе статорных обмоток АТ.

При $C_k = 0$, $x_{ck} = \infty$, $\dot{I}_{ck} = 0$, $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta}$ число электрических контуров и их уравнений электрического равновесия цепи генератора сокращается до трех:

$$\begin{aligned} 1. \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{I} \cdot Z, \\ 2. \dot{U}_1 &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_1 - \dot{U}_{c\Delta}, \\ 3. 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2/S + jx_2), \end{aligned} \quad (10)$$

а параметрические коэффициенты системы уравнений (3) принимают более простые по сравнению с (4) значения: $a=1$; $b = z_1 + z$; $c = z + jx_1 \cos \Theta$; $d = e^{j\Theta}$; $e = z + jx_1 \cos \Theta$; $f = z_1 + z - jx_{c\Delta}$. (10a)

Упрощаются выражения и для коэффициентов γ , Δ , α (5,8), но условия определения r_2/S , S , x_m по (8) и основной ЭДС E_1 с использованием кривой намагничивания остаются неизменными. По (7) опреде-

ляют токи генератора, по (10) напряжение \dot{U}_1 на выходе, затем другие величины. Для расчёта и построения необходимых характеристик расчёты повторяют для нескольких значений сопротивления Z_H нагрузки при постоянных $\cos \Phi_H$, x_c , $x_{c\Delta}$ или при изменении какой-либо из этих величин при постоянстве Z_H .

Исключение ёмкости C_Δ ($x_{c\Delta} = 0$) при $\Theta = 0$ преобразует машину в базовый вариант автономного асинхронного генератора (ААГ) [4, 5] с двумя соосными параллельными ветвями обмотки статора с одинаковыми их токами $\dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta = \frac{\dot{I}}{2}$ (рис. 1в). Число электрических контуров и уравнений для них, как и в КААГ равно трём:

$$\begin{aligned} 1. \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jx_1 \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 (Z_1 + jx_1) = \dot{I} \cdot Z, \\ 2. \dot{U}_1 &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cdot \dot{I}_1 = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta (Z_1 + jx_1), \\ 3. 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2/S + jx_2). \end{aligned} \quad (11)$$

при этом $\dot{E}_1 = \dot{E}_\Delta = \dot{E}_2 = -jx_m (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = -jx_m \dot{I}_0$, $Z_1 + jx_1 = r_1 + jx_1 + jx_1 = 2R_{1o} + j2x_{1o} = 2Z_{1o}$ - сопротивление параллельной ветви обмотки статора с учётом взаимноиндуктивной связи по полю рассеяния с другой параллельной ветвью своей фазы, $Z_{1o} = R_{1o} + jX_{1o}$ - параметры единой обмотки фазы статора [3].

ААГ является наиболее простым вариантом автономных асинхронных генераторов. Он не имеет внутренней ёмкостной компенсации ($x_{ck} = \infty$, $x_{c\Delta} = 0$), но имеет только внешнюю компенсацию с ёмкостью C , (x_c). Исходя из общности методики расчёта два уравнения статорной цепи представляют её токи $\dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta$, как и в (7), через основную ЭДС \dot{E}_1 и параметрические коэффициенты, выражения которых максимально упрощены: $a = 1$; $b = z_1 + z$; $c = z + jx_1$; $d = 1$; $e = z + jx_1$; $f = z_1 + z$;

$$\gamma = \Delta = \frac{1}{2z + z_1 + jx_1} = \frac{1}{2(z + z_{1o})}, \quad (12)$$

$$\text{откуда } \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta = (\gamma + \Delta) \dot{E}_1 = \frac{\dot{E}_1}{z + z_{1o}}.$$

Определение r_2/S , S , x_m , E_1 и других величин производится аналогично предыдущему. Уравнение электрического равновесия цепи ротора в системах (1, 9, 11) одинаково для всех модификаций генераторов, оно однозначно определяет ток \dot{I}_2 ротора через свою ЭДС $\dot{E}_2 = \dot{E}_1$ и параметры роторной цепи как

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{r_2/S + jx_2} = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} = \frac{\dot{E}_1}{Z_2}, \quad Z_2 = \frac{r_2}{S} + jx_2.$$

Автономный асинхронный генератор с ёмкостным внешним возбуждением прост, дешёв, надёжен, но имеет крупный недостаток - с ростом нагрузки резко падает его напряжение и частота [4, 5, 8]. Компенсированные генераторы в значительной мере ослабляют этот недостаток, они повышают степень жёсткости внешних характеристик и диапазон устойчивой работы при набросе нагрузки [2, 8]. На рис. 2 для сравнения показаны внешние характеристики трёх

модификаций автономных асинхронных генераторов с различными вариантами ёмкостного возбуждения, выполненных на базе асинхронного двигателя 4А71В2, $U_H = 220$ В, $I_H = 2,4$ А. В варианте обобщён-

ного компенсированного генератора с ростом нагрузки от холостого хода до номинальной при $\cos\varphi_H = 0,8$ напряжение падает не более чем на 5%, а перегрузочная способность по току превышает двукратную.

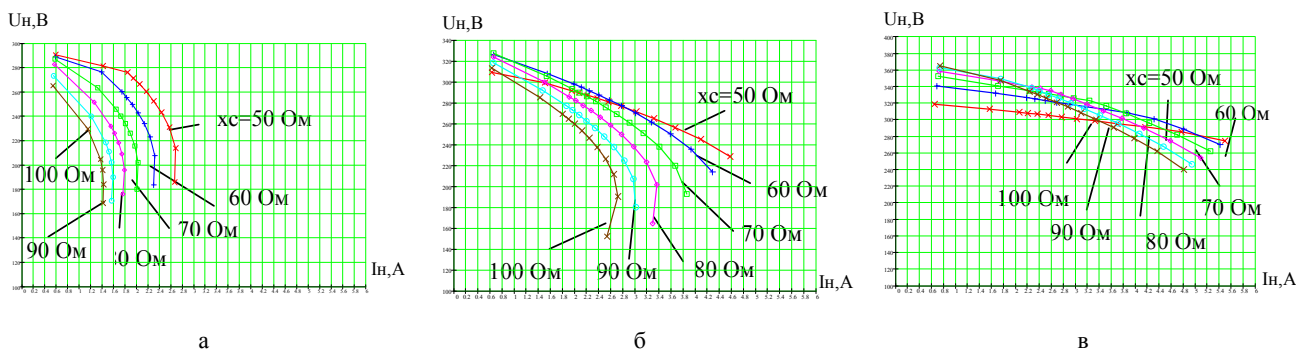


Рис. 2. Внешние характеристики автономных асинхронных генераторов: а – на базе асинхронного двигателя, б – компенсированный асинхронный генератор ($x_{c\Delta} = 50$) со смешанным ёмкостным возбуждением, в – обобщённый компенсированный асинхронный генератор с дополнительным возбуждением ($x_{c\Delta} = 50$, $x_{ck} = 100$)

Высокая перегрузочная способность компенсированных автономных генераторов и сохранение достаточной величины выходного напряжения при нагрузке определяют возможность удовлетворительного обеспечения наиболее тяжёлого для них режима пуска асинхронного двигателя соизмеримой мощности.

Представленный обобщённый метод расчёта характеристик автономных асинхронных генераторов при работе их на переменную нагрузку в установившемся процессе с достаточной для практики точностью можно распространить на некоторые динамические процессы, принимая их как квазиустановившиеся. Пуск асинхронного двигателя от автономного генератора с достаточной для практики точностью можно исследовать в квазиустановившемся процессе, как это делают, например, при расчёте системы "синхронный генератор – асинхронный двигатель" [7]. Такая возможность обеспечивается значительным превышением постоянной времени электрохимических процессов над постоянной времени электромагнитных переходных процессов, воздействием которых на электрохимические процессы во многих случаях можно пренебречь.

Расчёт характеристик асинхронного генератора при работе на асинхронный двигатель в автономной системе ведётся аналогично расчёту при работе генератора на статическую нагрузку Z_H , но с заменой сопротивления Z_H на полное сопротивление Z_d двигателя в квазиустановившемся процессе. Это сопротивление находится в сложной зависимости от скольжения S_d двигателя, его собственных и вносимых параметров, величины и знака угла Θ_d между полубмотками фазы статора и т.п. И, если в процессе разгона двигателя скольжение его задают в диапазоне $0 \leq S_d \leq 1$ (для условий машинного расчёта принимают $0,01 \leq S_d \leq 1$), собственные параметры $Z_{1d} = r_{1d} + jx_{1d}$, r_{2d} , x_{2d} и вносимые $x_{c\Delta d}$, x_{ckd} с достаточной степенью достоверности можно принять постоянными, то определение реактивного сопротивления x_{md} намагничивающего контура составляет особую сложность расчёта пусковых характеристик

двигателя.

В процессе пуска двигателя в автономной системе за счёт изменения скольжения S_d и сопротивления r_{2d}/S_d значительно изменяются его токи и напряжение, что уменьшает основной магнитный поток и основную ЭДС E_{1d} . В соответствии с кривой намагничивания увеличивается сопротивление x_{md} по сравнению с его номинальным значением x_{mn} при холостом ходе и номинальном напряжении машины.

При этом следует иметь в виду, что в автономной системе напряжение генератора \dot{U}_1 и двигателя \dot{U} едино, для генератора это выходное напряжение $\dot{U}_1 < \dot{E}_1$, для двигателя – входное $\dot{U}_1 > \dot{E}_{1d}$, причём $\dot{U} = -\dot{U}_1$, а $\dot{E}_1 > \dot{E}_{1d}$, $x_m < x_{md}$. Полные токи генератора \dot{I} и двигателя \dot{I}_d отличаются действием между ними тока \dot{I}_c внешней ёмкостной компенсации, $\dot{I}_d = \dot{I} - \dot{I}_c$.

Для определения сопротивления x_{md} намагничивающего контура двигателя как и в генераторе воспользуемся условием равновесия МДС или токов, которое для обобщённого компенсированного асинхронного двигателя (ОКАД) представляется как $\dot{I}_{1d} + I_{\Delta} e^{-j\Theta_d} = \dot{I}_{од} - \dot{I}_{2d}$ с той лишь разницей, что в генераторе из такого условия (6) определяют r_2/S , S , x_m , соответствующие заданной нагрузке (Z_H) и параметрам, а в двигателе при заданном скольжении S_d выражающем нагрузку, определяют $x_{m\partial}$ при соответствующих напряжении \dot{U}_1 , ЭДС \dot{E}_{1d} и параметрах.

Принцип расчёта характеристик асинхронных машин в автономном электрохимическом комплексе проведём на примере расчёта характеристик процесса пуска ОКАД от ОКААГ (рис. 3а). Основой для такого расчёта являются уже рассмотренные уравнения (1) электрического равновесия контуров цепи генератора и следующие уравнения двигателя:

$$\left. \begin{aligned} 1. \dot{U}_1 &= -\dot{E}_{1д} + \dot{I}_{1д} Z_{1д} + jx_{1д} \cos \Theta_{д} \cdot \dot{I}_{\Delta д} = \dot{I}_{д} \cdot Z_{д}, \\ 2. \dot{U}_1 &= -\dot{E}_{\Delta д} + \dot{I}_{\Delta д} Z_{\Delta д} + jx_{1д} \cos \Theta_{д} \cdot \dot{I}_{1д} + \dot{U}_{с\Delta д}, \\ 3. \dot{U}_{\Delta д} &= -\dot{E}_{\Delta д} + \dot{I}_{\Delta д} Z_{\Delta д} + jx_{1д} \cos \Theta_{д} \cdot \dot{I}_{1д} = -jx_{с\Delta д} \dot{I}_{с\Delta д} \\ 4. 0 &= \dot{E}_{2д} + \dot{I}_{2д} (r_{2д}/S_{д} + jx_{2д}). \end{aligned} \right\} (13)$$

при

$$\dot{E}_{1д} = \dot{E}_{2д} = -jx_{мд} (\dot{I}_{1д} + \dot{I}_{2д} + \dot{I}_{\Delta д} e^{-j\Theta_{д}}) = -jx_{мд} \dot{I}_{0д};$$

$$\dot{E}_{\Delta д} = \dot{E}_{1д} e^{j\Theta_{д}};$$

$$\dot{U}_{с\Delta д} = -jx_{с\Delta д} \cdot \dot{I}_{с\Delta д} = \dot{U}_1 - \dot{U}_{\Delta д} \approx \dot{E}_{\Delta д} - \dot{E}_{1д};$$

$$\dot{I}_{с\Delta д} = \dot{I}_{\Delta д} + \dot{I}_{с\Delta д}, \quad \dot{I}_{д} = \dot{I}_{1д} + \dot{I}_{\Delta д} + \dot{I}_{с\Delta д}.$$

Из уравнений (3,4) системы (13) выражаем

$$\dot{I}_{2д} = \frac{\dot{E}_{2д}}{r_{2д}/S_{д} + jx_{2д}} = \frac{\dot{E}_{1д}}{Z_{2д}} = \frac{jx_{мд}}{Z_{2м}} (\dot{I}_{1д} + \dot{I}_{\Delta д} e^{-j\Theta_{д}}),$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{с\Delta д} &= \frac{-j\dot{E}_{1д} e^{j\Theta_{д}} + j\dot{I}_{\Delta д} Z_{1д} - x_{1д} \cos \Theta_{д} \cdot \dot{I}_{1д}}{x_{с\Delta д}} \\ &= \frac{(jZ_S e^{j\Theta_{д}} - x_{1д} \cos \Theta_{д}) \cdot \dot{I}_{1д} + j(Z_S + Z_{1д}) \cdot \dot{I}_{\Delta д}}{x_{с\Delta д}} \end{aligned} \quad (14)$$

при $Z_S = jx_{мд} + \frac{x_{мд}^2}{Z_{2м}} = jx_{мд} \frac{Z_{2д}}{Z_{2м}}; Z_{1д} = Z_{\Delta д}.$

При представлении из уравнений (1,2) системы (13) токов $I_{1д}, I_{\Delta д}$ через напряжение \dot{U}_1 получаем

$$1) a_v \dot{U}_1 = b_v I_{1д} + c_v I_{\Delta д};$$

$$2) d_v \dot{U}_1 = e_v I_{1д} + f_v I_{\Delta д},$$

откуда $\dot{I}_{1д} = \gamma_v \cdot \dot{U}_1, \dot{I}_{\Delta д} = \Delta_v \cdot \dot{U}_1, \quad (15)$

где

$$\left. \begin{aligned} a_v &= d_v = 1; b_v = Z_{1д} + Z_S; \\ c_v &= Z_S e^{j\Theta_{д}} + jx_{1д} \cos \Theta_{д}; e_v = (Z_S e^{j\Theta_{д}} + jx_{1д} \cos \Theta_{д}) \cdot k_{с\Delta д} \\ f &= (Z_{1д} + Z_S) \cdot k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д}; k_{с\Delta д} = 1 + \frac{x_{с\Delta д}}{x_{с\Delta д}} \\ \gamma_v &= \frac{a_v \cdot f_v - c_v \cdot d_v}{b_v \cdot f_v - c_v \cdot e_v} = \\ &= \frac{(Z_{1д} + Z_S) \cdot k_{с\Delta д} - Z_S e^{-j\Theta_{д}} - jx_{1д} \cos \Theta_{д} - jx_{с\Delta д}}{(Z_{1д} + 2Z_S) Z_{1д} + x_{1д} \cos^2 \Theta_{д} (x_{1д} - j2Z_S) \cdot k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д} (Z_{1д} + Z_S)} \\ \Delta_v &= \frac{b_v \cdot d_v - a_v \cdot e_v}{b_v \cdot f_v - c_v \cdot e_v} = \\ &= \frac{Z_{1д} + Z_S - (Z_S e^{-j\Theta_{д}} + jx_{1д} \cos \Theta_{д}) \cdot k_{с\Delta д}}{(Z_{1д} + 2Z_S) Z_{1д} + x_{1д} \cos^2 \Theta_{д} (x_{1д} - j2Z_S) \cdot k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д} (Z_{1д} + Z_S)} \end{aligned} \right\} (16)$$

С учётом параметрических коэффициентов (16) и токов (14,15) полное сопротивление ОКАД может быть выражено через параметры его как

$$\begin{aligned} Z_{д} &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{д}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{1д} + \dot{I}_{\Delta д} + \dot{I}_{с\Delta д}} = \\ &= \frac{1}{\gamma \left(1 + j \frac{Z_S}{x_{с\Delta д}} e^{j\Theta_{д}} - \frac{x_{1д}}{x_{с\Delta д}} \cos \Theta_{д} \right) + \Delta \left(1 + \frac{Z_{1д} + Z_S}{x_{с\Delta д}} \right)} \end{aligned} \quad (17)$$

При разрешении токов $I_{1д}, I_{\Delta д}$ ОКАД из уравнений (1) и (2) системы (13) через основную ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ имеем

$$1) a_e \dot{E}_{1д} = b_e \dot{I}_{1д} + c_e \dot{I}_{\Delta д};$$

$$2) d_e \dot{E}_{1д} = e_e \dot{I}_{1д} + f_e \dot{I}_{\Delta д}, \text{ откуда } \dot{I}_{1д} = \gamma_e \cdot \dot{E}_{1д};$$

$$\dot{I}_{\Delta д} = \Delta_e \cdot \dot{E}_{1д}, \quad (18)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_e &= 1 - \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} e^{j\Theta_{д}}; b_e = Z_{1д} - Z_{д} \left(1 - \frac{x_{1д} \cos \Theta_{д}}{x_{с\Delta д}} \right); \\ c_e &= -jx_{1д} \cos \Theta_{д} - Z_{д} \left(1 + \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right); d_e = \left(k_{с\Delta д} - j \frac{Z_{д}}{x_{с\Delta д}} \right) e^{j\Theta_{д}}; \\ e_e &= jx_{1д} \cos \Theta_{д} \left(k_{с\Delta д} - \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) - Z_{д}; \\ f_e &= Z_{1д} \left(k_{с\Delta д} - j \frac{Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) - Z_{д} - jx_{с\Delta д}; \\ \gamma_e &= \frac{a_e \cdot f_e - c_e \cdot d_e}{b_e \cdot f_e - c_e \cdot e_e} \approx \\ &\approx \frac{Z_{1д} k_{с\Delta д} - Z_{д} \left(1 + \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) + Z_{д} e^{j\Theta_{д}} - jx_{с\Delta д}}{(Z_{1д} k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д}) \cdot (Z_{1д} - Z_{д}) - Z_{1д} Z_{д} \left(1 + j \frac{Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right)}; \\ \Delta_e &= \frac{b_e \cdot d_e - a_e \cdot e_e}{b_e \cdot f_e - c_e \cdot e_e} \approx \\ &\approx \frac{Z_{д} - Z_{д} e^{j\Theta_{д}} \left(k_{с\Delta д} + \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) + Z_{1д} k_{с\Delta д} e^{j\Theta_{д}}}{(Z_{1д} k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д}) \cdot (Z_{1д} - Z_{д}) - Z_{1д} Z_{д} \left(1 + j \frac{Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right)} \end{aligned} \right\} (19)$$

Из уравнения равновесия МДС и токов ОКАД

$$I_{1д} + I_{\Delta д} e^{-j\Theta_{д}} = \dot{I}_{0д} - \dot{I}_{2д}; E_1 \text{ следует}$$

$$\begin{aligned} 2(Z_{1д} k_{с\Delta д} + Z_{д} \cos \Theta_{д}) - Z_{д} \left(1 + k_{с\Delta д} + \frac{j2Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) - jx_{с\Delta д} \\ \frac{(Z_{1д} k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д}) \cdot (Z_{1д} - Z_{д}) - Z_{1д} Z_{д} \left(1 + j \frac{Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right)}{x_{мд}} - \frac{1}{Z_{2д}} \end{aligned} \quad (20)$$

Отметим идентичность уравнений равновесия параметров генератора (8) и двигателя (20) лишь с заменой сопротивления Z в уравнении (8) генератора на $(-Z_{д})$ в уравнении (20) двигателя.

На основе изложенного анализа принимаем следующий порядок расчета полного сопротивления $Z_{д}$ асинхронного двигателя и сопротивления $X_{мд}$ намагничивающего контура его в процессе пуска от асинхронного генератора в автономной системе:

- принимают несколько значений скольжения двигателя в диапазоне $0,01 \leq S_{д} \leq 1,0$, достаточных для построения необходимых характеристик и для каждого значения $S_{д}$ определяют $Z_{2д} = r_{2д}/S_{д} + jx_{2д};$

- учитывая, что в двигателе $\dot{U}_1 = -\dot{E}_{1д} + \dot{I}_{1д} Z_{1д}$ и $\dot{E}_{1д} < \dot{U}_1$, а в начале пуска напряжение \dot{U}_1 и ЭДС $\dot{E}_{1д}$ резко падают, предварительно принимают (в соответствии с кривой намагничивания и предполагаемой величиной $E_{1д}$) $x_{мд} \geq x_{мн}$ и находят соответствующее сопротивление

$$Z_s = jx_{mд} \frac{Z_{2д}}{Z_{2м}} = jx_{mд} \frac{Z_{2д}}{Z_{2д} + jx_{mд}};$$

- при заданных $x_{сΔд}, x_{скд}, \theta_d$ для принятой точки S_d по (16) находят γ_v, Δ_v , затем по (17) определяют Z_d - полное сопротивление двигателя при заданных условиях;

- по найденному Z_d для принятого S_d из (20) находят $x'_{мд}$, которое сравнивают с предварительно принятым $x_{мд}$.

- при значительных расхождениях ($>3\%$) между принятым $x_{мд}$ и найденным $x'_{мд}$ принимают новые значения $X_{мд}$ и методом последовательных приближений добиваются их соответствия по (20);

- Z_d , удовлетворяющее $x_{мд} \approx x'_{мд}$ учитывают в

$$Z = \frac{-jx_c \cdot Z_d}{Z_d - jx_c}$$

при расчете характеристик генератора; - после определения всех токов генератора, двигателя, напряжений, момента двигателя, мощностей и т.п. строят соответствующие характеристики (в т.ч. внешние для генератора, механические для двигателя) при анализе которых делают вывод о возможности запуска двигателя соизмеримой с генератором мощности в автономной системе, оценивают технико-экономические показатели при работе системы и отдельных машин различных модификаций по компенсации реактивной мощности, базовых величин и др.

Предложенная методика расчета процесса пуска двигателя от генератора в автономной системе справедлива при любых вариациях компенсированных и базовых серийных асинхронных двигателей и генераторов.

На рис. 3 показаны варианты асинхронных машин одинаковых модификаций в автономном электромеханическом комплексе. На месте источника и потребителя может быть любая КАМ в качестве генератора от ОКААГ до ААГ, в качестве двигателя от ОКАД до базового АД. Возможны различные сочетания модификаций этих машин. Например, от ОКААГ возможен запуск ОКАД, КАД, АД базовых мощностей, меньших базовой мощности ОКААГ. Наиболее благоприятен режим пуска ОКАД от ОКААГ, в которых за счет применения внутренней емкостной компенсации улучшаются характеристики как генератора так и двигателя, что обеспечивает надежный запуск двигателя от генератора одинаковых базовых мощностей.

В общем случае в автономной системе обеспечивается удовлетворительный запуск двигателя при развитии им момента M больше момента M_c нагрузки на 10-15% во всех точках скольжения вплоть до $S_n + 0,01$, где S_n - скольжение двигателя при нагрузке в установившемся процессе, когда $M = M_c$ [8]. Расчет времени пуска и процесса нагрева машин проводят по принятым в электроприводе методикам.

Возможны и другие способы определения сопротивления $x_{мд}$ намагничивающего контура двигателя при изменении его скольжения, в частности при выражении токов обмоток статора его через напряжение и основную ЭДС одновременно и при совместном разрешении уравнений двигателя и генератора.

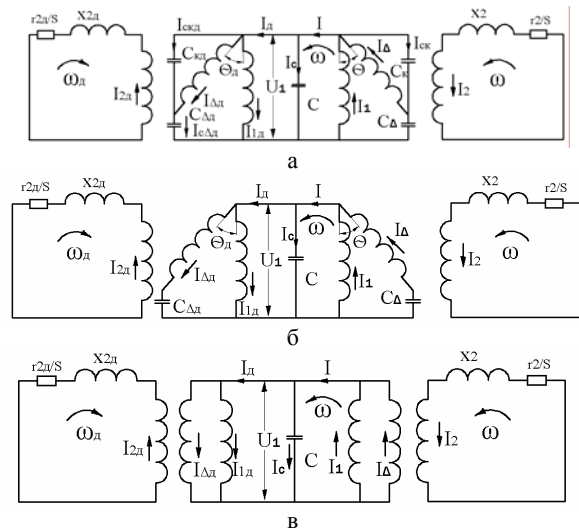


Рис. 3. Электромеханический комплекс в автономной системе с асинхронными машинами: а - обобщённые компенсированные автономный асинхронный генератор (ОКААГ) и асинхронный двигатель (ОКАД); б - компенсированный асинхронный двигатель (КАД) и компенсированный автономный асинхронный генератор (КААГ), в - автономный асинхронный генератор - асинхронный двигатель (АД)

Работа по совершенствованию компенсированных асинхронных машин и их совместному действию в автономных электромеханических комплексах продолжается. Результаты исследований и их анализ будут представлены в последующих публикациях авторов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мишин В.И., Лут Н.Т. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулировочными характеристиками. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ" №17. Харків - 2001. С. 110-112.
- [2] Мишин В.И., Каплун В.В. и др. Автономные асинхронные генераторы повышенной эффективности. Електрифікація та автоматизація сільського господарства №2-4, 2006, С. 41-51.
- [3] Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А.Э Кравчик., М.М. Шлаф и др. - М.: Энергоиздат, 1982. - 504 с.
- [4] Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. - 840 с.
- [5] Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. - М.: Высш. шк., 1982. - 272 с.
- [6] Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. - М.: Высшая школа, 1977. - 343 с.
- [7] Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей - М. - Л.: ГЭИ, 1963. - 528 с.
- [8] Методика розрахунку характеристик автономних асинхронних генераторів зі змішаним емісним збудженням (Мишин В.И., Каплун В.В. та ін.) НАУ. Київ - 2007, 44 с.

Поступила 03.09.2007