

КОМПЕНСИРОВАННЫЙ АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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

Розглянуто основні теоретичні положення та фізичні процеси компенсованої асинхронної машини в режимі генератора.

Рассмотрены основные теоретические положения и физические процессы компенсированной асинхронной машины в режиме генератора.

Асинхронный генератор (АГ), выполненный на базе асинхронного короткозамкнутого двигателя, прост, дешев, надежен, но не обеспечивает удовлетворительных рабочих и динамических характеристик, особенно в автономном режиме [1].

Автономный асинхронный генератор (ААГ) является весьма перспективным индивидуальным электромеханическим источником электроэнергии при условии реализации простого решения проблемы стабилизации его напряжения и частоты при изменении нагрузки.

Такой генератор работает на принципе ёмкостного самовозбуждения при наличии остаточного магнетизма в стали ротора. Но для создания рабочего магнитного поля ему нужна реактивная мощность. Источником реактивной мощности обычно служат конденсаторы электрической ёмкости, включенные параллельно обмотке статора на выходе генератора (рис. 1а).

При вращении ротора от проводного двигателя со скоростью ω ЭДС обмотки статора $E_{ост}$ от остаточного потока ротора создает в конденсаторах реактивный ток, который, совпадая по фазе с магнитным потоком, подмагничивает систему, увеличивает поток, что приводит к росту ЭДС и намагничивающего тока, магнитного потока и т.д. Генератор возбуждается до точки "а" (рис. 2) пересечения вольт-амперных характеристик асинхронной машины $U_L(I)$ и ёмкости $U_C(I)$, что при холостом ходе машины соответ-

ствует резонансу токов при $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$. Отсюда частота колебаний контура $L-C$ будет равна

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. При холостом ходе генератора она совпадает с угловой скоростью ω вращения вала ротора ($\omega = \omega_0$) и скольжение $S = 0$. Индуктивность цепи генератора может быть определена по параметрам Т-образной схемы замещения асинхронной машины

[2] при холостом ходе $L = \frac{x_1 + x_m}{\omega_0}$, которые приняты для базовой частоты $f = 50$ Гц переменного тока.

При работе генератора на нагрузку Z_H и ём-

кость "С" рабочий ток его I_1 опережает выходное напряжение \dot{U}_1 по фазе, т.к. генератор требует реактивную мощность для создания магнитного потока Φ и компенсации реактивной мощности нагрузки при индуктивно-активном характере ее при $Z_H = r_H + jx_H$. Тогда ёмкостный ток \dot{I}_C , опережающий напряжение \dot{U}_1 по фазе на 90° , состоит из двух частей (векторная диаграмма рис. 1б), из которых часть "b d" обеспечивает намагничивание генератора током \dot{I}_0 и создание поля рассеяния, а часть "a b" компенсирует реактивную составляющую тока нагрузки I_H .

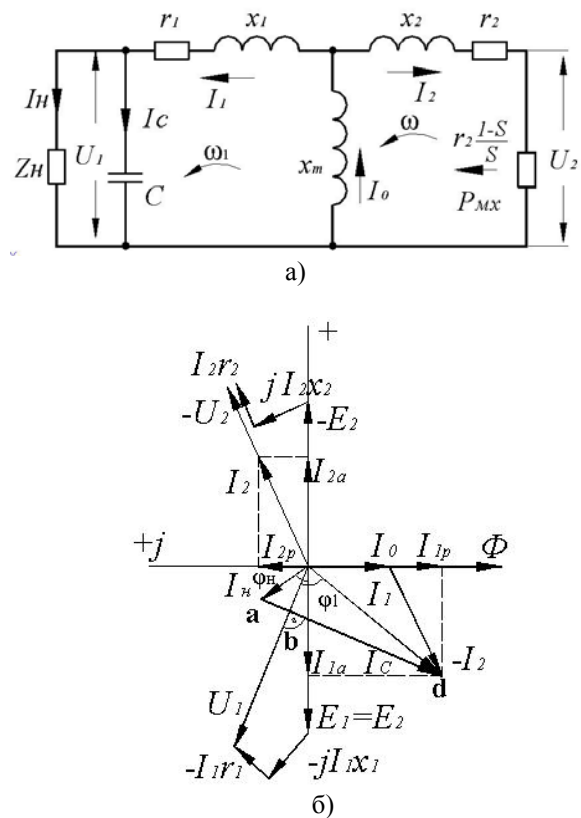


Рис. 1. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) фазы автономного асинхронного генератора при нагрузке

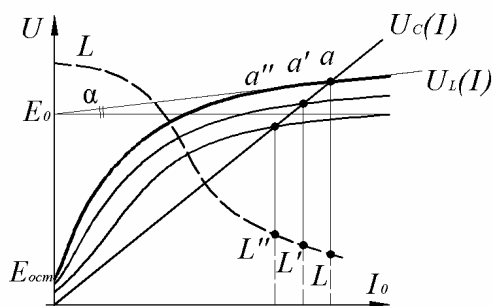


Рис. 2. Характеристики холостого хода и нагрузочные автономного асинхронного генератора.

Автономный асинхронный генератор по схеме рис. 1а при приведении обмотки ротора к обмотке статора эквивалентен трансформатору с первичной цепью в роторе и вторичной в статоре. Но по аналогии с двигателем роторные величины первичной цепи обозначаем индексом "2", а статорные для вторичной цепи индексом "1".

Входным генерирующим элементом такого трансформатора является так называемое вносимое [1] сопротивление $r_2 \frac{1-S}{S} < 0$ при $S < 0$, на которое поступает мощность приводного двигателя, равная $P_{мх} = M\omega$, где M - момент приводного двигателя, ω - его скорость.

В схеме замещения (рис. 1а) как в физической модели генератора входная механическая мощность $P_{мх} = M\omega$ заменяется ее тепловым эквивалентом $I_2^2 r_2 \frac{1-S}{S} = U_2 I_2$ в сопротивлении $r_2 \frac{1-S}{S}$. Известно, что в асинхронном генераторе механическая скорость ротора ω больше скорости ω_1 вращения поля статора и поэтому скольжение $S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} < 0$.

В автономных электрических установках в качестве приводного двигателя часто используется дизель, у которого довольно надежно, путем автоматического изменения подачи топлива и его состава в зависимости от нагрузки на валу, обеспечивается стабилизация скорости вращения $\omega = const$ и изменение вращающего момента M . Выражение (1) устанавливает связь между механическими и электрическими величинами в роторе

$$P_{мх} = M\omega = I_2^2 r_2 \frac{1-S}{S} = U_2 I_2. \quad (1)$$

Здесь U_2 рассматривается как некоторое условное входное напряжение или первичное напряжение источника с внутренним сопротивлением $r_2 \frac{1-S}{S}$ и

$$U_2 = I_2 r_2 \frac{1-S}{S}.$$

Активный характер механической мощности и ее электрического аналога $P_{мх} = \dot{U}_2 \dot{I}_2^*$ определяет совпадение по фазе входных величин напряжения \dot{U}_2

и тока \dot{I}_2 , следовательно, полное (эквивалентное) сопротивление Z_{Σ} всей цепи автономного генератора по отношению к \dot{U}_2 должно быть чисто активным

$$Z_{\Sigma} = r_2 + jx_2 + \frac{jx_m(Z + r_1 + jx_1)}{Z + r_1 + jx_1 + jx_m} = R_{\Sigma}, \quad (2)$$

где r_1, r_2, x_1, x_2, x_m - параметры асинхронной машины [2], $Z = \frac{-jx_c Z_H}{Z_H - jx_c} = r - jx$ - полное сопротивление с учетом нагрузки $Z_H = r_H + jx_H$ и конденсатора с

$$\text{сопротивлением } x_c = \frac{1}{\omega_0 C},$$

$$r = \frac{x_c^2 r_H}{r_H^2 + (x_H - x_c)^2}, \quad x = x_c \frac{r_H^2 - x_H x_c + x_H^2}{r_H^2 + (x_H - x_c)^2} \quad (3)$$

Изменение нагрузки Z_H или ёмкости C в переходном процессе нарушает условие (2), а восстановление его при неизменной скорости ω приводного двигателя приводит к изменению частоты $\omega_1 \neq \omega_0$ и напряжения U_1 на выходе генератора. Так с ростом активно-индуктивного тока нагрузки уменьшается ёмкостная составляющая тока I_1 для намагничивания ААГ, происходит уменьшение намагничивающего тока $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ и размагничивание системы. (Предполагаем, что с ростом активной части нагрузки увеличивается и уравнивающий ее момент приводного двигателя и ток \dot{I}_2).

Отличие от генератора, включенного в сеть с напряжением U [3], которое своим постоянным по величине намагничивающим током и потоком препятствует размагничиванию системы, в автономном генераторе нет такого сдерживающего фактора как напряжение сети и поэтому с ростом нагрузки происходит значительное размагничивание его (рис.2), увеличение индуктивности (точки $a-L, a'-L', a''-L''$). Это ведет к снижению частоты колебаний контура $L-C$, скорости вращения поля статора $\omega_1 < \omega_0$, напряжения U_1 на выходе генератора. При постоянной скорости ω вала приводного двигателя увеличивается (в отрицательном направлении) скольжение $S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} < 0$,

уменьшается частота тока в статоре $f_1 = \frac{f}{1-S}$, где f - частота в статоре при холостом ходе генератора, равная базовой частоте 50 Гц.

Этот недостаток автономного асинхронного генератора ограничивает его применение для ответственных потребителей.

Для стабилизации напряжения и частоты при изменении нагрузки прибегают к таким действиям как регулирование скорости приводного двигателя, подмагничивание постоянным током спинки магнитопровода статора, изменение ёмкости батареи конденсаторов [3, 4, 5] и т.п. Например, с ростом нагруз-

ки увеличивают ёмкость конденсаторов, при этом рост ёмкостного тока препятствует размагничиванию системы, что в некоторой мере стабилизирует частоту и величину напряжения генератора. Однако такие способы усложняют и удорожают установку, снижают степень ее надежности.

Расчетные уравнения автономного асинхронного генератора в симметричном установившемся режиме могут быть представлены уравнениями электрического равновесия цепей ротора и статора одной фазы в виде

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 + \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = -\dot{I}_2 r_2 \frac{1-S}{S}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = \dot{I}_1 Z,$$

где $\dot{U}_2 = -\dot{I}_2 r_2 \frac{1-S}{S}$ условное первичное напряжение

при $S < 0$ уравновешено ЭДС \dot{E}_2 обмотки ротора и падением напряжения в ней, вторичное напряжение \dot{U}_1 создано ЭДС \dot{E}_1 обмотки статора с учетом падения напряжения в ней. При этом

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = -jx_m \dot{I}_0 \quad (5)$$

полное сопротивление Z нагрузки и конденсатора принимается по (3), как $Z = r - jx$.

При расчете сопротивление нагрузки может быть задано необходимой мощностью P_H , $\cos \varphi_H$, напряжением U_H , а сопротивление конденсаторов x_c определяется ёмкостью C , необходимой для компенсации реактивной мощности нагрузки и намагничивания генератора. В последнем случае учитывают, что коэффициент мощности $\cos \varphi_G$ генератора меньше чем $\cos \varphi_D$ двигателя, на базе которого он выполнен. Это объясняется тем, что в асинхронном двигателе и генераторе противоположны фазы активных составляющих токов статора и ротора при неизменных по фазе реактивных токах [1,5]. По отношению к неизменным по фазе ЭДС обмоток статора изменяются фазы падений напряжения в них. Поэтому при одинаковых значениях рабочих токов $I_1 = I_1'$ для создания в генераторе напряжения $\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1(r_1 + jx_1)$ такой же величины, что и в двигателе $\dot{U} = -\dot{E}_1' + \dot{I}_1'(r_1 + jx_1)$ при $U = U_1$ требуется увеличить ЭДС E_1 генератора по сравнению с E_1' двигателя, т.е. увеличить его реактивный намагничивающий ток, что снижает величину $\cos \varphi_G$. Его значение находят из расчета уравнений (4), но для этого необходимо знать величину ёмкости C , которая может быть предварительно принята при учете $\cos \varphi_G$ по данным [5], где энергетические возможности генератора принимаются из условия одинаковых тепловых потерь в обмотках статора генератора и базового двигателя.

В отличие от генератора при расчете уравнений электрического равновесия цепей статора и ротора асинхронного двигателя заданными являются параметры машины и напряжение сети, а скольжение S

однозначно связано с нагрузкой, например, через выходную механическую мощность $P_{\text{мх}} = I_2^2 r_2 \frac{1-S}{S}$.

Задаваясь величиной S , определяют токи, мощности, момент и строят соответствующие характеристики в пределах изменения $0 \leq S \leq 1$.

В автономном асинхронном генераторе напряжение U_1 на выходе является искомой величиной, связь между скольжением и нагрузкой однозначно не определена, поэтому для расчета уравнений (4) требуется дополнительное условие в виде зависимости скольжения от нагрузки. Такое условие может быть выражено уравнением баланса активных мощностей ААГ. Так мощность приводного двигателя

$P_{\text{мх}} = I_2^2 r_2 \frac{1-S}{S} < 0$ расходуется на нагрузку

$P_H = UI_H \cos \varphi_H = UI_{\text{на}} = I_H^2 r_H = I_1^2 r$, потери мощности в обмотках статора $\Delta P_{\text{м1}} = I_1^2 r_1$ и ротора

$\Delta P_{\text{м2}} = I_2^2 r_2$ или

$$-P_{\text{мх}} = P_H + \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{м2}}. \quad (6)$$

Для согласования соответствия скольжения и нагрузки и определения их связи по уравнению баланса мощности необходимо предварительно знать модули токов цепей, которые заранее неизвестны и лишь предстоят расчету, для чего в свою очередь требуется знать скольжение и его связь с нагрузкой. Для преодоления этого противоречия, принимаем как следствие из уравнения баланса мощности более простое уравнение баланса активных составляющих электромагнитных мощностей ААГ. Электромагнитная мощность первичной цепи (ротора) равна

$$P_{\text{эм2}} = \text{Re} \left[\dot{E}_2 \cdot \dot{I}_2^* \right] = |P_{\text{мх}}| - \Delta P_{\text{м2}}, \quad (7)$$

где $\dot{I}_2 = I_{2a} + j\bar{I}_{2p}$ (см. рис. 1б).

При размещении $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ по оси действительных чисел комплексной плоскости векторы и модули ЭДС совпадают, т.е. $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = E_1 = E_2$. Тогда, $P_{\text{эм2}} = E_2 I_{2a} < 0$, т.е. отдается первичной обмоткой, а принимается во вторичной в виде $P_{\text{эм1}} = \text{Re} \left[\dot{E}_1 \cdot \dot{I}_1^* \right] = P_H + \Delta P_{\text{м1}}$

При $\dot{I}_1 = -I_{1a} - jI_{1p}$ (рис. 1б) электромагнитная активная мощность вторичной цепи равна $P_{\text{эм1}} = E_1 I_{1a} > 0$. По условию равновесия активных мощностей цепей имеем $-P_{\text{эм2}} = P_{\text{эм1}}$ или $-E_2 I_{2a} = E_1 I_{1a}$ что при $E_1 = E_2$ дает равенство активных составляющих токов первичной и вторичной цепей

$$I_{2a} = -I_{1a}. \quad (8)$$

Из схемы замещения ААГ по рис. 1а следует

$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{Z_{1\text{э}}}$, где $Z_{1\text{э}} = z + r_1 + jx_1 = r + r_1 + j(x_1 - x) = R_{1\text{э}} + jx_{1\text{э}}$ - полное сопротивление вторичной цепи,

относительно друг друга на угол Θ даёт смещение по фазе ЭДС этих обмоток на этот же угол, что обеспечивает необходимое напряжение на конденсаторе с ёмкостью C_{Δ} , которое равно $\dot{U}'_C = \dot{U}_1 - \dot{U}_{\Delta}$, а без учёта падения напряжения в обмотках $\dot{U}_C \approx \dot{E}_1 - \dot{E}_{\Delta}$ (рис. 3б). Так при $\Theta = 30^\circ$ это напряжение равно $U_C \approx \frac{U_{\phi}}{2}$ (рис. 3а), а при включении конденсаторов по схеме Δ на выходных концах дополнительной обмотки $U_C \approx \frac{U_{\text{л}}}{2}$ (рис. 4), где U_{ϕ} - фазное, $U_{\text{л}}$ - линейное напряжение генератора при соединении обмоток статора его по схеме Y . В практике по условиям технологической простоты наиболее удобен угол Θ , равный 30° . Его получают делением 60° фазной зоны трёхфазной обмотки на две равные части с пространственным сдвигом между ними 30° [6]. В случае, когда нет возможности получить $\Theta = 30^\circ$ его принимают 20° – 40° с выполнением основной и дополнительной обмоток в двух различных слоях паза.

Взаимоиндуктивная связь между обмотками при ёмкостном токе I_{Δ} дополнительной обмотки определяет внутреннюю передачу реактивной мощности электромагнитным путём из дополнительной обмотки в основную обмотку статора и в обмотку ротора. Это повышает внутренний коэффициент мощности генератора, снижает величину необходимого ему намагничивающего тока, который по отношению к основным обмоткам статора и ротора определяется из (10) как $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_{\Delta} e^{-j\Theta} + \dot{I}_2$, а по отношению к дополнительной обмотке из (11)

$$\dot{I}'_0 = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) e^{-j\Theta} + \dot{I}_{\Delta} = \dot{I}_0 e^{j\Theta}. \quad (12)$$

При этом $\dot{I}_1 + \dot{I}_{\Delta} e^{-j\Theta} = \dot{I}'$ создаёт намагничивающую составляющую МДС поля генератора (со стороны ёмкостных источников реактивной мощности), индуктивная составляющая тока нагрузки $I_{\text{н}}$ и поля рассеяния обмоток статора и ротора размагничивают систему. Общий ток \dot{I} вторичной цепи генератора равен сумме токов $\dot{I}_1 + \dot{I}_{\Delta}$ рабочих обмоток статора, с другой стороны он равен сумме токов нагрузки $\dot{I}_{\text{н}}$ и ёмкости \dot{I}_c , т.е.

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{\Delta} = \dot{I}_{\text{н}} + \dot{I}_c. \quad (13)$$

Принцип работы компенсированного автономного асинхронного генератора (КААГ), приведенного к эквивалентному неподвижному трансформатору иллюстрируется рис. 3а,б.

Возбужденный на основе явления остаточного магнетизма и ёмкостного намагничивания генератор приводится во вращение приводным двигателем со скоростью на валу ω и вращающим моментом M . Механическая мощность $P_{\text{мх}} = M\omega$ в эквивалентной схеме, равная электрической, генерируется в сопротивлении $r_2 \frac{1-S}{S}$, т.е., $P_{\text{мх}} = I_2^2 r_2 \frac{1-S}{S} = U_2 I_2$.

Вращение ротора в сочетании с ёмкостным намагничиванием и самовозбуждением генератора создает вращающийся магнитный поток Φ , который индуцирует в обмотках соответствующие ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ и $\dot{E}_{\Delta} = \dot{E}_1 e^{j\Theta}$.

В отличие от обычного ААГ в КААГ имеются две обмотки статора – основная с \dot{E}_1 и дополнительная с \dot{E}_{Δ} и две электрические ёмкости C и C_{Δ} . При холостом ходе генератора ($Z_{\text{н}} = \infty$), они обе используются для намагничивания, самовозбуждения его и создания частоты колебательного контура $\omega_0 = \omega$. В обмотках статора действуют две составляющих намагничивающего тока от \dot{I}_1 и \dot{I}_{Δ} , причем \dot{I}_{Δ} создан напряжением $\dot{U}'_c \approx \dot{E}_1 - \dot{E}_{\Delta}$ на ёмкости C_{Δ} и опережает его по фазе на угол 90° . Одновременно он является током дополнительной обмотки с активной и реактивной составляющими по отношению к ЭДС \dot{E}_{Δ} и ее напряжению $\dot{U}'_{\Delta} = \dot{E}_{\Delta} - \dot{I}_{\Delta}(r_{\Delta} + jx_{\Delta})$, где r_{Δ}, x_{Δ} - внутренние сопротивления обмотки. В последующем они приняты одинаковыми с сопротивлениями основной обмотки, $r_{\Delta} = r_1, x_{\Delta} = x_1$. Таким образом, дополнительная обмотка, как и основная, является носителем как активной, так и реактивной мощности, обе принимают на себя активную нагрузку генератора, но обмениваются между собой реактивными мощностями. Дополнительная обмотка электромагнитным путем передает реактивную мощность в основную обмотку и в ротор.

С ростом электрической нагрузки индуктивно-активного характера на выходе генератора увеличивается ток нагрузки $\dot{I}_{\text{н}}$, его активная и реактивная составляющие (например, при $\cos \varphi_{\text{н}} = \text{const}$). И если активная нагрузка уравнивается моментом и мощностью приводного двигателя, то рост реактивной нагрузки при постоянной ёмкости C размагничивает систему, что снижает намагничивающий ток, поток, ЭДС, напряжение на выходе генератора и его частоту f_1 , скорость вращения поля $\omega_1 < \omega$. При постоянной скорости ω приводного двигателя скольжение $S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}$ становится отрицательным и возрастает по величине.

Однако, так происходит процесс в обычном ААГ с одной обмоткой статора и постоянной ёмкостью на выходе. В компенсированном генераторе обе обмотки статора являются рабочими. С ростом нагрузки растут и токи I_1 и I_{Δ} . Так как I_{Δ} является одновременно и током ёмкости C_{Δ} , то с увеличением нагрузки рост его приводит к увеличению напряжения на конденсаторе $U'_c = I_{\Delta} x_{C\Delta}$ и выработки реактивной мощности $Q_{C\Delta} = I_{\Delta}^2 x_{C\Delta}$ конденсатором с ёмкостью C_{Δ} . Увеличение ёмкостной мощности $Q_{C\Delta}$ компенсирует рост индуктивной части нагрузки

и поля рассеяния, предотвращает размагничивание системы, стабилизирует напряжение и частоту на выходе генератора. В зависимости от величины C_{Δ} , её соотношения с величиной "С", схемы включения конденсаторов с ростом нагрузки напряжение генератора и частота могут уменьшаться в заданном пределе, оставаться практически постоянными или даже возрастать. Такое свойство КААГ в отношении влияния на внешнюю характеристику делает его подобным генератору постоянного тока смешанного возбуждения при согласном действии МДС параллельной и последовательной обмоток возбуждения. В компенсированном генераторе параллельная ёмкость "С" обеспечивает намагничивание его при холостом ходе, создание ЭДС определённой частоты в обмотках. Долевое участие в процессе возбуждения при холостом ходе принимает и ёмкость C_{Δ} , но главное своё назначение – стабилизировать напряжение и частоту она выполняет при изменении нагрузки. Она последовательно включена с дополнительной рабочей обмоткой и потому с ростом тока I_{Δ} нагрузки ростом своей ёмкостной мощности препятствует размагничиванию генератора.

Расчётные уравнения электрического равновесия фазы КААГ в симметричном установившемся режиме в соответствии со схемой рис. 3а запишем в виде

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1(r_1 + jx_1 + jx_m) + jx_m(\dot{I}_2 + \dot{I}_{\Delta}e^{-j\theta}) = -\dot{I}Z; \\ \dot{U}_1 &= \dot{I}_{\Delta}(r_{\Delta} + jx_{\Delta} - jx_{c\Delta}) + jx_m(\dot{I}_1 + \dot{I}_2)e^{-j\theta} = -\dot{I}Z; \end{aligned} \quad (14)$$

$$0 = \dot{I}_2\left(\frac{r_2}{S} + jx_2 + jx_m\right) + jx_m(\dot{I}_1 + \dot{I}_{\Delta}e^{-j\theta}).$$

С учётом (10,11) представим эти уравнения через $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{I}_1 Z_{1\Omega} + \dot{I}_{\Delta} Z, \\ \dot{E}_1 &= [\dot{I}_{\Delta}(Z_{1\Omega} - jx_{c\Delta}) + \dot{I}_1 Z]e^{-j\theta}, \\ \dot{E}_2 &= \dot{E}_1 = \dot{I}_2\left(\frac{r_2}{S} + jx_2\right), \end{aligned} \quad (15)$$

где $Z = \frac{-jx_c Z_H}{Z_H - jx_c} = r - jx$, $Z_{1\Omega} = r_1 + jx_1 + Z$.

Откуда выражаем токи через \dot{E}_1 , как

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}_1(Ze^{j\theta} - Z_{1\Omega} + jx_{c\Delta})}{Z^2 - Z_{1\Omega}^2 + jx_{c\Delta}Z_{1\Omega}}, \\ \dot{I}_{\Delta} &= \frac{\dot{E}_1(Z - Z_{1\Omega}e^{j\theta})}{Z^2 - Z_{1\Omega}^2 + jx_{c\Delta}Z_{1\Omega}}, \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{E}_1}{\frac{r_2}{S} + jx_2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Из условия равенства активных составляющих электромагнитных мощностей первичной и вторичной цепей КААГ следует равенства активных составляющих токов $I_{1a} + I_{\Delta a} = -I_{2a}$, которые при сокращении на \dot{E}_1 представится равновесием активных составляющих эквивалентных сопротивлений первичной и вторичной цепей. Из этого условия определяется

скольжение S , соответствующее заданной в виде сопротивления Z_H нагрузке и ёмкостей C и C_{Δ} генератора. Перебором этих величин можно определить широкий спектр изменения скольжения КААГ и выбрать необходимое его значение при расчёте энергетических показателей генератора для обеспечения заданной нагрузки в установившемся режиме. При этом нагрузка задаётся величиной необходимой мощности. Компенсированный автономный генератор обеспечивает стабилизацию выходного напряжения и частоты или их изменение в заданных пределах в широком диапазоне изменения нагрузки.

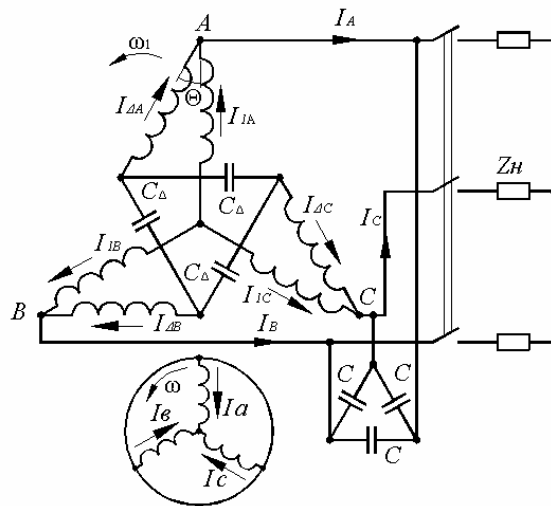


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема компенсированного автономного асинхронного генератора

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974-840 с.
- [2] Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник (Кравчик А.Э., Шлаф М.М. и др.). – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
- [3] Специальные электрические машины (под ред. А.И. Бертинова). – М., Энергоиздат, 1982. – 552 с.
- [4] Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
- [5] Лісник В.Я., Шуруб Ю.В. Вплив параметрів асинхронної машини та схемних рішень системи збудження на характеристики автономного асинхронного генератора із змішаним навантаженням. Електрифікація і автоматизація сільського господарства. №2. 2006. Київ.
- [6] Мишин В.И., Лут Н.Т. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулирующими характеристиками. Вісник Національного технічного університету "ХПІ" №17, Харків. 2001. С. 110-112.

Поступила 30.08.2006