

Марков В.С.

ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ГИПОТЕЗ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОНОМНЫХ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Введение. В настоящее время развитие нетрадиционной энергетики, в частности, ветроэнергетики, усилило интерес к использованию асинхронной машины (АМ) в качестве силовой установки особенно малых автономных электростанций. Несомненные достоинства АМ по сравнению с синхронной – простота, надежность, относительная дешевизна, меньше проблем с охлаждением обмоток и короткими замыканиями, перекрываются рядом недостатков: необходимостью установки массивных и дорогостоящих конденсаторных батарей для возбуждения генератора, а также сложностью работы с активно-индуктивными нагрузками, что приводит к проблеме стабилизации напряжения.

Исследования и создание математических и компьютерных моделей асинхронного генератора (АГ) сталкиваются с рядом трудностей. Так, например, в технической литературе практически не приводятся характеристики холостого хода АМ с короткозамкнутым ротором с конкретными значениями величин ЭДС статора E_1 и тока статора I_μ (тока намагничивания). Обычно их приводят в качественном виде (рис. 1). Эта характеристика важна для получения достоверной математической модели АМ в режиме генератора, особенно для компьютерного моделирования, и численного расчета. По сложившимся представлениям именно кривая намагничивания $E = f(I_\mu)$ АГ определяет максимальное значение установившегося после возбуждения напряжения на обмотках статора. Во-первых, следует развивать теорию самовозбуждения АГ, в рамках которой есть различные гипотезы, не подтвержденные экспериментальными данными. Во-вторых, теоретические выкладки в соответствующих публикациях и расчет компьютерных моделей АГ также зачастую никак не связаны с экспериментальными данными, полученными на реальных АМ, что существенно снижает их теоретическую и практическую ценность. Поэтому необходимы исследования АМ в генераторном режиме на реальном оборудовании.

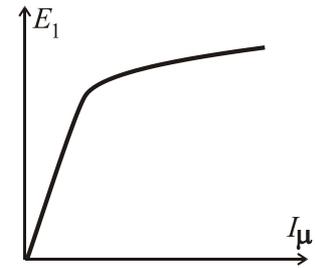


Рисунок 1 – Внешний вид теоретической характеристики холостого хода АМ

Анализ публикаций и исследований по проблематике самовозбуждения АГ.

АГ может работать и в автономных условиях, но в этом случае для получения реактивной мощности, необходимой для намагничивания генератора, используется батарея конденсаторов, которая подключается к выводам АГ параллельно нагрузке, как показано на рис. 2, где Д – приводной двигатель. Конденсаторы могут быть включены не только звездой, но и треугольником рис. 3, M_B – внешний механический момент, Z_H – полное сопротивление нагрузки.

Традиционное и общепринятое объяснение самовозбуждения АГ приведено в [1,2,3], где указывается, что условием самовозбуждения является наличие остаточного магнетизма в стали ротора. При вращении ротора генератора с частотой, близкой к номинальной, за счет остаточного намагничивания ротора поток остаточного магнетизма

$\Phi_{ост}$ создает в обмотке статора некоторую остаточную ЭДС $E_{ост}$, под действием которой в конденсаторную батарею потечет ток I_{1c} , усиливающий поток $\Phi_{ост}$ (рис. 4). Эта ЭДС наводит в цепи конденсаторов и машины ток I_{1c} , который усиливает поле машины и создает ЭДС E_1 . Обычно $E_{ост}$ при шихтованном роторе составляет $2\div 3\%$ от номинального значения.

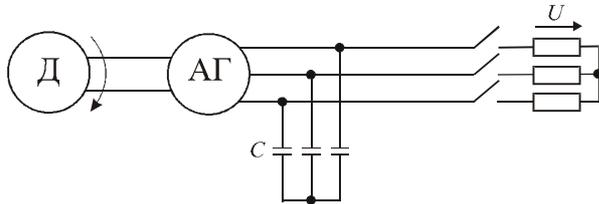


Рисунок 2 – Включение конденсаторной батареи в фазы обмотки статора АГ

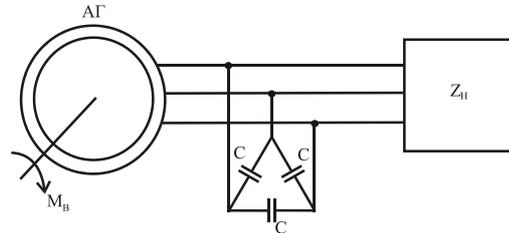


Рисунок 3 – Конденсаторы возбуждения, включенные треугольником

Далее токи и МДС возрастают, пока их значения не установятся в точке пересечения характеристики холостого хода генератора с вольт-амперной характеристикой цепи конденсаторов ($X_C I_C$) и не станут равными току I_1 и ЭДС E_1 (рис. 4). Причем, возбуждение возможно только при пересечении характеристики намагничивания статора и вольт-амперной характеристики конденсатора. Конденсаторная батарея создает опережающий реактивный ток или реактивную мощность необходимую для возбуждения. Напряжение на генераторе зависит от емкости конденсаторов: чем меньше емкость, тем больше угол α (рис. 4). При небольших значениях емкости вольт-амперная характеристика $X_C I_C$ не пересекается с характеристикой холостого хода АГ и машина не возбуждается. Напряжение на генераторе зависит также от вида характеристики намагничивания. Таким образом, возбуждение АГ аналогично самовозбуждению генератора постоянного тока.

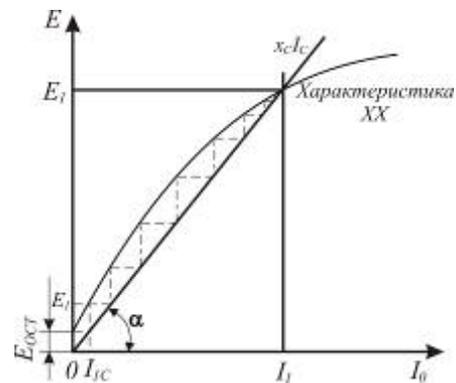


Рисунок 4 – К самовозбуждению АГ

Однако автору данной статьи неоднократно удавалось возбудить АГ за счет конденсаторов вольт-амперная характеристика которых лежала выше чем характеристика холостого хода АГ. К тому же процесс возбуждения начинается на частотах вращения ротора значительно больших чем частота холостого хода, где сильно проявляется размагничивающий эффект от тока ротора, и поэтому характеристика намагничивания на этих частотах уходит вниз относительно той, что изображена на рис. 1 и рис. 4

Существуют еще две гипотезы (версии или трактовки) процесса самовозбуждения АГ, которые в целом не противоречат друг другу, признавая друг друга как частный случай.

Первая из них – параметрический резонанс [5,6,7] в системе без явного присутствия источника ЭДС в колебательном контуре при периодическом изменении какого-либо из её параметров. Следует заметить, что и первая гипотеза имеет, если не как причину самовозбуждения, то как следствие параметрический резонанс. Отсутствие источника питания, а также неограниченный рост тока и напряжения в линейной колебательной системе, несмотря на наличие потерь в ней, являются принципиальными отличительными признаками параметрического резонанса. [5,7] указывается, что были про-

ведены эксперименты, которые показывают, что в системе АГ – емкость самовозбуждения может возникнуть и при полном отсутствии остаточного потока (ротор АГ выполнен из немагнитных материалов). В то же время, указывается, что оно не возникает при определенных соотношениях между параметрами системы, несмотря на значительную величину остаточного потока и при любых значениях присоединенной емкости. Надо отметить, что в данных работах о подобных экспериментах ничего подробно не сообщается, кто и когда их проводил, также не приводят никакие численные значения параметров.

В [5] сделан вывод, что АМ с симметричным ротором при пренебрежении зубчатостью воздушного зазора представляет собой систему с периодически изменяющейся взаимной индуктивностью обмоток статора и ротора, в связи с чем в системе «АГ-ёмкость» могут возникать электромагнитные колебания, имеющие параметрическую природу. При нарастании тока в якоре возникает несимметрия магнитной системы по продольной и поперечной оси (динамическая явнополюсность). В этом случае, при совпадении результирующего вектора магнитного поля с осью фазы обмотки ротора, ее индуктивное сопротивление минимально. В процессе самовозбуждения вращению результирующего вектора магнитного поля с угловой частотой ω соответствует частота периодического изменения эквивалентной индуктивности обмотки ротора 2ω , поэтому эквивалентная индуктивность АМ выражается как

$$L_{\omega}(t) = L(t)[1 - m(t) \cos 2\omega t], \quad (1)$$

где m – глубина модуляции индуктивности.

Максимальная глубина модуляции индуктивности связана, главным образом, с величиной воздушного зазора машины и рассеянием обмоток и уменьшается при их увеличении. В высокоскоростных АГ повышенной частоты значение ее несколько ниже, чем в обычных машинах, и не превышает в среднем 0,55.

Условием развития колебаний является неравенство, записанное в виде

$$m > 2R / \omega L. \quad (2)$$

Хотя ни теоретического, ни экспериментального обоснования формулам (1) и (2) в [5] не приводится.

Вместе с тем, как отмечается в [5], определение закономерностей самовозбуждения делает необходимым дальнейший анализ, который сводится к исследованию нелинейного однородного дифференциального уравнения второго порядка с периодическими коэффициентами

$$\frac{d\Phi}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = 0, \quad (3)$$

где Φ – магнитный поток, представляющий собой однозначную функцию тока и времени.

Впрочем, решение данного уравнения в общем виде не может быть дано даже при гармоническом изменении индуктивности [5].

В [6] рассматривается Т-образная схема замещения АГ (рис. 5) и указывается, что можно представить, что энергия, поступающая в колебательный контур, зависит от

сопротивления R_2'/s активного элемента, подключенного к зажимам 1-1' двухполюсника, а следовательно и скольжения s . Для возникновения электрических колебаний необходимо, чтобы система находилась в резонансном состоянии и входное сопротивление двухполюсника 1-1' при резонансной частоте было бы чисто активным, что соответствует совпадению по фазе векторов тока и напряжения на входе этого двухполюсника. Для определения резонансных частот можно найти входное сопротивление относительно зажимов 1-1'

$$Z = j\omega L_2' + \frac{j\omega L_0 \left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C} \right)}{R_1 + j\omega(L_1 + L_0) + \frac{1}{j\omega C}} \quad (4)$$

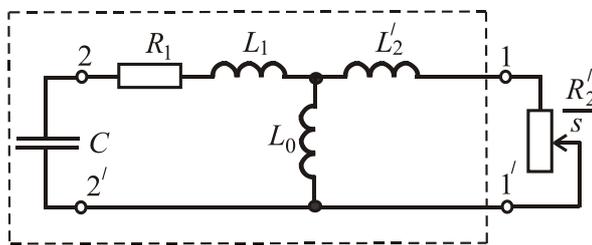


Рисунок 5 – Т-образная схема замещения АГ

Условие резонанса соответствует равенство нулю мнимой части сопротивления $\text{Im } Z=0$, которое возможно только в том случае, если значение емкости конденсаторов возбуждения $C_n < C < C_b$. При выполнении этого условия годограф пересекает вещественную ось

в двух точках с координатами $Z = R_n$ и $Z = R_n$ при частотах вращения ω_b и ω_n , соответствующих условиям резонансов токов (ω_n) и напряжений (ω_b) (рис. 6).

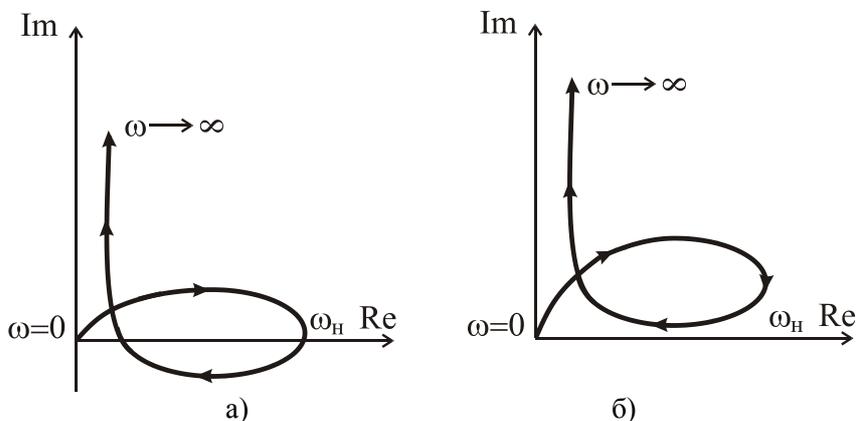


Рисунок 6 – Годографы $Z(j\omega)$ при изменении угловых частот $\omega=0-\infty$ при существовании резонансов тока и напряжения в АГ, когда он возбуждается (а) и при отсутствии возбуждения (б)

Для выполнения условий баланс активных мощностей в системе необходимо, чтобы $\text{Re}Z = R_2'/s$. Частоты электрических колебаний при мягком возбуждении АГ можно найти для определенного значения, а для определения их амплитуды требуется решение нелинейной задачи.

В [7] утверждается, что возбуждение АГ происходит, когда система находится в состоянии резонанса и удовлетворялись условия согласования условного двухполюсника (рис. 5) относительно зажимов 1-1' (или 2-2').

Таким образом, реактивная проводимость относительно 1-1' должна быть равной нулю, или входное сопротивление двухполюсника должно быть чисто активным и численно равным $-R_2'/s$, так как $s < 0$. Входное сопротивление двухполюсника относительно со стороны зажимов 1-1'

$$\underline{Z} = jX_2' + \frac{jX_0 [R_1 + j(X_1 - X_C)]}{R_1 + j(X_0 + X_1 - X_C)} \quad (5)$$

По условиям резонанса: $\text{Im } \underline{Z}_{\text{вх}} = 0$, $\text{Re } \underline{Z}_{\text{вх}} = -\frac{R_2'}{s}$.

После некоторых преобразований:

$$\text{Re } \underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{R_1 L_0^2 C^2 \omega^4}{R_1^2 C^2 \omega^2 + [(L_0 + L_1) \omega^2 C - 1]^2}, \quad (6)$$

$$\text{Im } \underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{A \omega^5 + B \omega^3 + D \omega}{R_1^2 C^2 \omega^2 + [(L_0 + L_1) \omega^2 C - 1]^2}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A &= L_2' (L_0 + L_1)^2 C^2 + L_0 L_1^2 C^2 + L_0^2 L_1 C^2; \\ B &= L_2' R_1^2 C^2 - 2L_2' C (L_0 + L_1) + R_1^2 L_0 C^2 - 2L_0 L_1 C - L_0^2 C; \\ D &= L_0 + L_2'. \end{aligned}$$

Видно, что (6) представляет собой четную функцию, значение которой при $\omega=0$ равно нулю, а при $\omega \rightarrow \infty$

$$\text{Re } \underline{Z}_{\text{вх}} = R_1 \left[\frac{L_0}{L_0 + L_1} \right]^2.$$

Для определения возможного максимума функции (6) обратимся к $[\text{Re } \underline{Z}_{\text{вх}}]'_{\omega} = 0$, что дает $\omega_{1,2} = \pm \sqrt{2 / [2C(L_0 + L_1) - R_1^2 C^2]}$, т.е. значения частоты ω , при которых $\text{Re } \underline{Z}_{\text{вх}}$ имеет максимальные отклонения от своего среднего значения. А так как $2C(L_0 + L_1) > R_1^2 C^2$, то эти максимумы $\text{Re } \underline{Z}_{\text{вх}}$ реализуемы. Функция (7) представляет собой нечетную функцию, значение которой при $\omega=0$ также равно нулю, а при $\omega \rightarrow \infty$.

В [7] указывается, что условия возникновения первоначального процесса самовозбуждения есть:

$$\begin{cases} \text{Im } \underline{Z}_{\text{вх}} = 0; \\ [\text{Im } \underline{Z}_{\text{вх}}]' = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Не при всех значениях емкости машина может самовозбуждаться. Этот процесс начинается только с некоторого критического значения $C_{\text{кр}}$, при котором генератор начинает самовозбуждаться

$$C_{кр} = \frac{[2L'_2(L_0 + L_1) + 2L_0L_1 + L_0^2](L_0 + L'_2)R_1^2 - \Delta}{R_1^4(L_0 + L'_2)^2}, \quad (9)$$

где

$$\Delta = \left\{ \left[(2L'_2(L_0 + L_1) + 2L_0L_1 + L_0^2)^2 - L_0^4(L_0 + L'_2)R_1^4 \right] \right\}^{1/2}.$$

Частота ω при критическом значении емкости дает

$$\omega = \sqrt{\frac{8AD(L_0 + L_1)C_{кр} + 2AB + 2BD(L_0 + L_1)^2 C_{кр}^2 - 4ADR_1^2 C_{кр}}{4A^2 - 4AD(L_0 + L_1)^2 C_{кр}^2 + 4AD(L_0 + L_1)C_{кр} + 2B^2(L_0 + L_1)^2 C_{кр}^2 - 2ABR_1^2 C_{кр}^2}}. \quad (10)$$

В диапазоне $C_{кр} < C < C_{max}$ функция $\text{Im } \underline{Z}_{вх} = 0$ пересекает ось ω в двух точках, которые и определяют граничные условия самовозбуждения генератора.

Явление самовозбуждения АГ, как процесс параметрического резонанса, и в настоящее время находит последователей [8]. Причем, в данной работе процесс самовозбуждения электрических машин рассматривается с точки зрения теории автоматического управления. Рассматривается система уравнений АГ с конденсаторным возбуждением

$$\begin{cases} i_C = C \frac{dU_C}{dt} \\ i_{ст} = i_C + i_H \\ u_H = u_C = \frac{d\Psi_{ст}}{dt} - i_{ст}R_{ст} - L_{\sigma 1} \frac{di_{ст}}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

где $i_{ст}$ – ток статора, i_H – ток нагрузки, i_C – ток через конденсатор, $R_{ст}$ – активное сопротивление статорной обмотки, $L_{\sigma 1}$ – индуктивность рассеяния статорной обмотки.

Этим уравнениям соответствует следующая структурная схема [8]

Условия самовозбуждения АГ, при пренебрежении $R_{ст}$

$$c_e \omega_{вр} w_{ст} L_{\Gamma} \geq X_C \left(1 + \frac{X_{\sigma 1}}{Z_H} \right) + X_{\sigma 1} \quad (12)$$

Левая часть неравенства фактически является индуктивным сопротивлением АГ $X_{АГ}$, а фактически отражает характеристику холостого хода генератора $E_{\Gamma} = f(i_C)$. Из данного выражения следует, что при увеличении нагрузки АГ до определенного значения режим генерации прекращается. При этом сопротивление нагрузки должно быть не менее значения, определяемого выражением

$$Z_H \geq \frac{X_C X_{\sigma 1}}{X_{АГ}(Z_H) + X_{\sigma 1} - X_C} \quad (13)$$

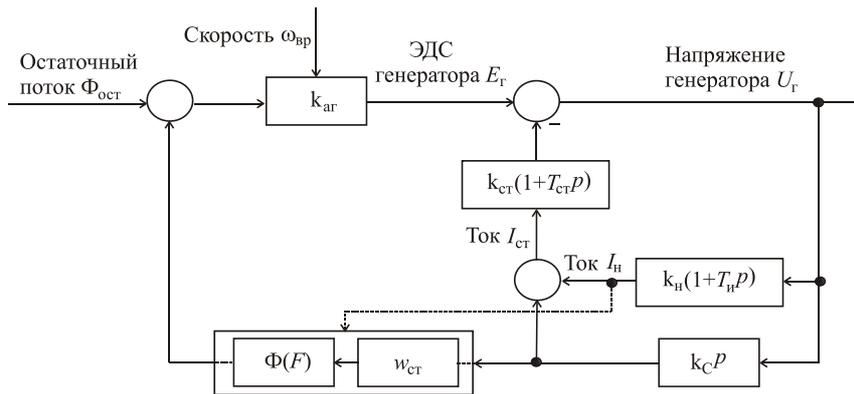


Рисунок 7 – Структурная схема АГ

Составляющая X_{AG} (Z_H) отражает дополнительную зависимость индуктивного сопротивления АГ, обусловленную размагничивающим действием реакции якоря (пунктирная линия на рис.7). При этом за счет изменения индуктивного сопротивления АГ частота выходного напряжения изменяется, что фактически означает появление скольжения в АГ при нагрузке. На рис.8 поясняется процесс самовозбуждения АГ по аналогии с генератором постоянного тока, где 1– критическое значение сопротивления, 2 – вольт-амперная ха-

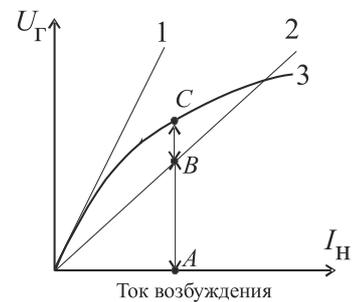


Рисунок 8

рактеристика конденсаторной батареи, 3 – кривая намагничивания, отрезок AB соответствует $I_C \left(X_C + \frac{X_C X_{\sigma 1}}{Z_H} + X_{\sigma 1} \right)$, а

отрезку $BC \int_0^t \frac{I_C}{C} dt$.

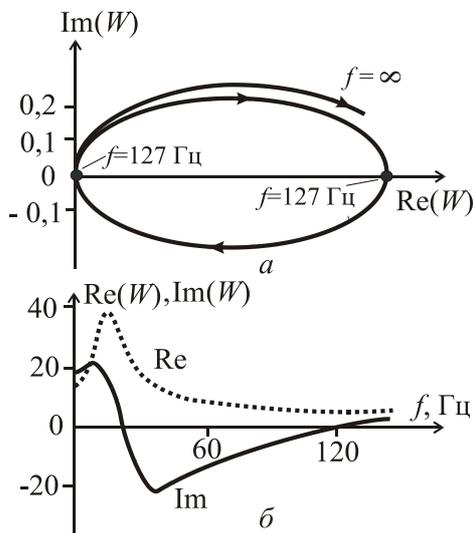


Рисунок 9 – Амплитудно-фазочастотные характеристики АГ:
а – годограф;
б – мнимая и действительная части

На рис. 9 показан результат анализа АГ в частотной области в виде амплитудно-фазочастотной характеристики. Как следует из рис. 9 а резонанс (возбуждение) возможен в двух точках, характеризующих обращение мнимой составляющей в ноль. Первая точка (справа) характеризуется низкой (рабочей) частотой и резонансом токов в схеме замещения АГ. Вблизи этой точки, при изменении нагрузки, за счет реакции якоря происходит изменение X_m , а следовательно, резонансной частоты и скольжения АГ. Вторая точка характеризуется резонансом напряжения и определяется индуктивными сопротивлениями рассеяния.

Как отмечается в [8] в АГ ввиду

наличия двух типов накопителей энергии – ёмкости и индуктивности, возможно возникновение параметрического резонанса. Более того, там же утверждается, что для возникновения колебаний вовсе не требуется остаточный магнитный ротор. Суть параметрического возбуждения в том, чтобы при начальном потенциальном запасе энергии в системе изменять по величине один из накопителей. Например, когда изначально заряжен конденсатор, а индуктивность меняется полупроводниковым ключом. Для возникновения параметрического резонанса в L - C контуре должно соблюдаться условие

$$\frac{\Delta L}{L} > \frac{\pi}{Q}, \quad (14)$$

где Q – добротность контура.

Однако в АГ при повороте ротора относительно статора происходит естественная высокочастотная модуляция индуктивности машины за счет зубцов магнитной системы, достигающая до 30–40 %.

Еще одна гипотеза говорит о том, что устройство «асинхронная машина – ёмкость» в структурном отношении, по принципам действия и свойствам представляет собой типичную автоколебательную систему (рис. 10) [9–12]. Причем, в авторы [9,10] рассматривают явление параметрический резонанс, как некоторый частный случай автоколебательного режима.

Кроме того указывается, что остаточное магнитное поле необходимое для самовозбуждения АГ может быть создано статором или ротором. Хотя в [9] утверждается, что удалось возбудить машину с абсолютно размагниченным или даже немагнитным ротором, но никаких данных об эксперименте не приводится.

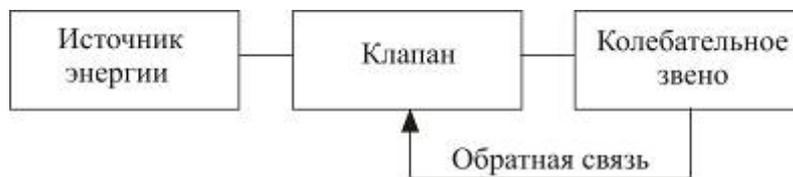


Рисунок 10 – Структурная схема типичной автоколебательной системы

Очевидно, если при каждом такте колебаний восполнять энергию потерь за счет увеличения электромагнитного поля индуктивности или электростатического поля конденсатора, то можно обеспечить непрерывную генерацию колебаний со стороны контура. Отсюда устанавливается важное и известное условие самовозбуждения баланс амплитуды и фазы. Роль клапана в АГ выполняет роторная цепь. Поступление энергии в такт колебаниями контура обеспечивается роторной цепью до тех пор, пока сохраняются условия выполнения требований баланса амплитуды и фазы.

Рост колебаний возможен при условии, что полная мощность вырабатываемая машиной $E_1 I_1$ больше чем мощность конденсаторной батареи $U_C J_C$. Однако из-за нелинейности характеристики холостого хода она обязательно пересечется с вольт-амперной характеристикой конденсаторной батареи. Точка их пересечения определит граничный режим работы устройства, при котором рассматриваемые значения мощностей сравняются (рис. 4). Далее АГ не сможет выступать в роли усилителя мощности, т.е. возможности для роста амплитуды колебаний будут исчерпаны, что не противоречит традиционному объяснению самовозбуждения АГ.

Толчок к началу самовозбуждения этой системы нужен только в случае, если по тем или иным причинам режим работы устройства пришелся на зону частотного гистерезиса, причем наиболее надежный толчок обеспечивается за счет импульса предварительно заряженной конденсаторной батареи. Если же режим работы машины выбран в зоне уверенного возбуждения, то она возбуждается мягко, и к первопричине колебаний не должно предъявляться каких-либо требований, поскольку роль первоначального импульса может сыграть ничтожно малая внешняя наводка или флуктуация контура. Поскольку рост возникающих при самовозбуждении колебаний ограничивается на уровне, определяемом насыщением машины, то, следовательно, «асинхронная машина – ёмкость» – типично нелинейная система. Что касается практических мер по обеспечению самовозбуждения АГ, то условия энергетического баланса и малого затухания контура (колебательный режим его работы) заставляют стремиться к уменьшению активных сопротивлений машины. Границы зоны самовозбуждения (нижняя и верхняя критическая частота вращения ротора):

$$\Omega_{\text{н.к.}} = \frac{1}{p\sqrt{L_0C}} \left(1 + \frac{r_1 r_2' C}{L_0} \right), \quad \Omega_{\text{в.к.}} = \frac{r_1 + r_2'}{p r_1} \sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_2')C}}. \quad (15)$$

А также нижняя и верхняя граница резонансной частоты контура

$$\omega_{\text{н.к.}} = \frac{1}{\sqrt{L_0C}}; \quad \omega_{\text{в.к.}} = \frac{1}{\sqrt{(L_0 + L_2')C}}. \quad (16)$$

Для соответствующих скольжений

$$|s_{\text{н.к.}}| = \frac{r_1 r_2' C}{L_0}; \quad |s_{\text{в.к.}}| = \frac{r_2'}{r_1}. \quad (17)$$

В [10], также как и в [9], отмечается, что широко распространена точка зрения, что причиной возбуждения АГ является остаточное намагничивание ротора машины и возникновение в обмотке статора начальной ЭДС синхронной частоты. Эта точка зрения противоречит ряду экспериментов [9], показывающих возможность самовозбуждения генератора при полном начальном размагничивании ротора или даже при выполнении его из немагнитного материала. **(Опять об экспериментах ничего не сообщается!)**. При этом оказывается, что остаточное намагничивание, тем не менее, влияет на условия возбуждения и при намагниченном роторе возбудить машину легче, чем при его полном размагничивании. В [10] показано, что причиной самовозбуждения АГ являются колебания, возникающие в системе с отрицательным сопротивлением на частотах,

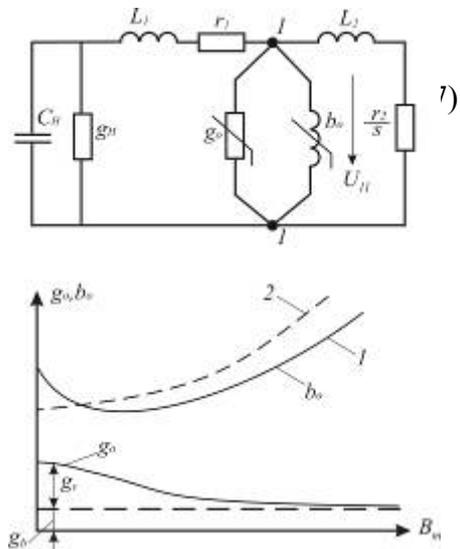


Рисунок 11 – Т-образная схема замещения одной фазы АГ (а) и зависимости g_0 , b_0 от B_m (б)

соответствующих балансу амплитуд и фаз или реактивных и активных мощностей основной гармонической составляющей автоколебаний в нелинейной системе. На рис. 11 показана эквивалентная T-образная схема замещения одной фазы автономного АГ, ротор которого вращается с угловой частотой ω_p , а к зажимам статора подключена симметричная активно-емкостная нагрузка g_n, C_n . Возбуждение генератора наступает при некоторой частоте тока статора ω , создающего вращающееся магнитное поле. При этом напряжение между зажимами 1-1 в эквивалентной схеме может быть отлично от нуля только при равенстве нулю комплексной проводимости \underline{Y} между этими точками. Таким образом, условием самовозбуждения генератора служит равенство

$$\underline{Y} = g_0 - jb_0 + \frac{1}{r_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{g_n + j\omega C_n}} + \frac{1}{\frac{r_2}{S} + j\omega L_2} = 0, \quad (18)$$

выполнимое только при отрицательном скольжении $S = \frac{\omega - \omega_p}{\omega} < 0$

Активная и индуктивная проводимости представляют собой те нелинейные элементы цепи, которые ограничивают амплитуду автоколебаний или напряжение самовозбуждения генератора. Наиболее существенен для возбуждения генератора вид характеристики $b_0(B_m)$. B_m – амплитуда гармонической составляющей с частотой ω_p . При синусоидальном изменении индукции во времени кривая $b_0(B_m)$ имеет немонотонный характер (кривая 1, рис.11 б). В области малых значений B_m (релеевская область характеристики стали) эквивалентная индуктивность мала, следовательно, значение b_0 велико. С ростом амплитуды изменения магнитной индукции индуктивность растет и b_0 уменьшается, а по мере перехода в область насыщения стали индуктивность уменьшается, и b_0 растет. В случае мягкого возбуждения автоколебаний, при любых начальных условиях устанавливается автоколебательный режим. В случае жесткого возбуждения АГ, возбуждение возможно только при кратковременном изменении параметров, причем остаточное намагничивание ротора оказывает лишь косвенное воздействие на возбуждение АГ.

Условие самовозбуждения АГ можно выразить как равенство линейной и нелинейной проводимости

$$Y_n(\alpha) = Y_n(B_m), \quad (19)$$

где $\alpha = \omega_p / \omega$.

В [11] утверждается, что роль условного «стартера» в генераторе может выполнить не только остаточная индукция ротора, но и остаточная индукция статора. Поскольку статор АГ выполнен из электротехнической стали, то его остаточная индукция не равна нулю, при условии, что АГ хотя бы раз находился в работе. Используемая в [11] зависимость взаимоиנדуктивности от тока намагничивания $M = f(i_\mu)$ получена в ходе экспериментальных исследований асинхронной машины серии МТ-11-6. Значения этой зависимости в узлах сплайн-аппроксимации представлены в таблице 1.

До подключения конденсаторов в обмотке статора индуцируется остаточная ЭДС двойной частоты, амплитуда которой очень мала и составляет в данном случае

$E_m=1,57 \cdot 10^{-7}$ В. При этом самовозбуждение отсутствует. Коммутация конденсаторов определенной ёмкости приводит к плавному росту амплитуды, а значит к самовозбуждению. Частота напряжения также уменьшается до своего резонансного значения. В реальном АГ после наступления самовозбуждения происходит вращательное намагничивание стали статора, что полностью устраняет причины возникновения напряжения двойной частоты.

Таблица 1

| № узла | i_{μ} | M |
|--------|-----------|------|
| 1. | 0 | 0,87 |
| 2. | 0,004 | 1,03 |
| 3. | 0,011 | 1,22 |
| 4. | 0,02 | 1,35 |
| 5. | 0,044 | 1,52 |
| 6. | 0,102 | 1,65 |
| 7. | 0,206 | 1,68 |
| 8. | 0,314 | 1,65 |
| 9. | 0,510 | 1,5 |
| 10. | 0,702 | 1,33 |
| 11. | 0,852 | 1,19 |
| 12. | 1,059 | 1,03 |
| 13. | 1,4 | 0,82 |
| 14. | 1,8 | 0,67 |
| 15. | 2,3 | 0,54 |

ной связи по магнитной цепи, поэтому электрическая цепь этого тока не имеет принципиального значения и не показывается на рис. 9.

Эквивалентное комплексное сопротивление схемы замещения (рис. 12) без учета g_H относительно взаимной индуктивности M обмоток равно

$$\underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ЭКВ}} + jX_{\text{ЭКВ}} = \frac{\left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_H} \right) \right] \left[\frac{r_2}{s} + j\omega L_2 \right]}{\left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_H} \right) \right] + \left[\frac{r_2}{s} + j\omega L_2 \right]} \quad (20)$$

В [11] утверждается, что «стартеры», обусловленные несимметрией ротора, не оказывают влияния на значение емкости конденсаторов, при котором наступает самовозбуждение АГ. Это объясняется тем, что на начальном этапе самовозбуждения данные «стартеры» не создают значительных намагничивающих токов. В этом случае автогенераторные условия самовозбуждения, т.е. условия, при которых генератор теряет устойчивость, определяются значением взаимной индуктивности АГ при намагничивающем токе равном нулю. Эти «стартеры» создают только первоначальный импульс (толчок), который при наличии положительной обратной связи, в дальнейшем усиливается, что и приводит, в конечном счете, к конденсаторному самовозбуждению АГ.

В [12] рассматриваются особенности самовозбуждения АГ, в частности, указывается, что у него коэффициент усиления и коэффициент положительной обратной связи – комплексные числа. Это связано с тем, что в АГ с конденсаторным самовозбуждением изменяется не только амплитуда, но и частота ЭДС. Для определения этих коэффициентов в [12] воспользовались Т-образной схемой замещения АГ (без учета потерь в стали). Она преобразована относительно нелинейности M и вводится входной ток, который имеет ту же частоту, что и ЭДС генератора (рис. 12). Этот ток суммируется с током обратной

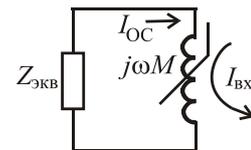


Рисунок 12

Комплексный коэффициент обратной связи (ОС) в АГ равен обратному значению комплексного сопротивления, по которому протекает намагничивающий ток (ток обратной связи), т.е.

$$\underline{K}_{oc} = \frac{1}{\underline{Z}_{эКВ}} = \frac{\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right) + j \left(\omega L_1 + \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_H} \right)}{\left[r_1 \frac{r_2}{s} - \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_H} \right) \omega L_2 \right] + j \left[r_1 \omega L_2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_H} \right) \frac{r_2}{s} \right]}. \quad (21)$$

В свою очередь комплексный коэффициент усиления АГ, равный

$$\underline{K}_y = -\frac{1}{\underline{Z}_{эКВ}} = -j\omega M = -j \frac{p\Omega_p}{1-s} M, \quad (22)$$

где p – число пар полюсов АГ; Ω_p – угловая скорость ротора.

Возникновение колебаний в АГ возможно, если $\underline{K}_{oc} \underline{K}_y > 1$, что является автогенераторным условием самовозбуждения АГ. По мере приближения к установившемуся режиму коэффициент усиления начинает уменьшаться за счет влияния нелинейности до тех пор, пока не наступит равновесие, т.е. установившийся режим самовозбуждения и

$$\underline{K}_{oc} \underline{K}_y = 1. \quad (23)$$

Это равенство выполняется при соблюдении баланса амплитуд и фаз и соблюдается в момент нарушения устойчивости.

Выражение (21) можно представить в следующем виде

$$jM > \frac{R_{эКВ}}{\omega} + j \frac{X_{эКВ}}{\omega}. \quad (24)$$

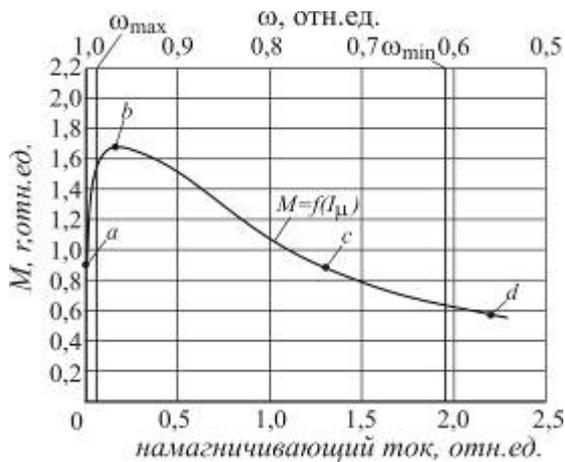
Если допустить, что при самовозбуждении АГ активное сопротивление $R_{эКВ}=0$, тогда получим следующее выражение, которое является вещественной частью (24)

$$\frac{R_{эКВ}}{\omega} = r_1^2 \frac{r_2}{s} + r_1 \left[\left(\frac{r_2}{s} \right)^2 + (\omega L_{\sigma 2})^2 \right] + \left(\omega L_{\sigma 1} - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \frac{r_2}{s} = 0. \quad (25)$$

Это квадратное уравнение является уравнением баланса активных сопротивлений или баланса фаз и позволяет определить частоту генерируемых колебаний при известной скорости вращения ротора и является первым автогенераторным условием самовозбуждения АГ.

Второе автогенераторное условие конденсаторного самовозбуждения АГ представляет собой мнимую часть (24).

$$\frac{\left[r_1 \frac{r_2}{s} - \left(\omega L_{\sigma 1} - \frac{1}{\omega C} \right) \omega L_{\sigma 2} \right] \left(\omega L_{\sigma 1} + \omega L_{\sigma 2} - \frac{1}{\omega C} \right)}{\omega \left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + \left(\omega L_{\sigma 1} + \omega L_{\sigma 2} - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]} \cdot \frac{\left[r_1 \omega L_{\sigma 2} + \left(\omega L_{\sigma 1} - \frac{1}{\omega C} \right) \frac{r_2}{s} \right] \left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)}{\omega \left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + \left(\omega L_{\sigma 1} + \omega L_{\sigma 2} - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]} < M = f(I_{\mu}). \quad (26)$$

Рисунок 13 – Зависимость $M(I_{\mu})$

Данное выражение для установившегося режима самовозбуждения, т.е. при $jM = jX_{\text{эКВ}} / \omega$, известно как уравнение баланса реактивных сопротивлений (проводимостей) или баланса амплитуд. Причем, в АГ частота колебаний оказывает влияние на (26). На рис. 10 показана зависимость взаимной индукции от намагничивающего тока [12]. Если значение взаимной индуктивности обмоток статора и ротора АГ лежит вблизи точки b на кривой $M(I_{\mu})$ (рис. 13), т.е. там, где находится максимальное значение M , то емкость конденсаторов возбуждения может быть снижена, тогда исследуемая система мягко входит в режим автоколебаний, и требуются меньшие значения

емкостей возбуждения, чем при нахождении значения M на интервале между точками c и d .

В [12] сделаны следующие выводы:

1) в автономном АГ имеет место жесткий режим конденсаторного возбуждения (т.е. напряжение при самовозбуждении АГ возрастает скачком независимо от стартера, т.к. скачком возрастает намагничивающий ток);

2) стартер в виде остаточной индукции ротора обычно играет положительную роль при асинхронном возбуждении АГ, однако его чрезмерное усиление может препятствовать этому процессу, поскольку выпадение из синхронизма в этом случае становится проблематичным, несмотря на выполнение автогенераторных условий самовозбуждения;

3) в установившемся режиме асинхронного самовозбуждения при наличии вращательного перемагничивания ротора уравнение баланса мощностей не соблюдается;

4) для самовозбуждения автономного АГ с полым немагнитным ротором необходимо иметь остаточную индукцию на статоре;

5) самовозбуждение АГ на синхронной частоте невозможно.

В работе [13] используется разработанная математическая модель АГ в трехфазной системе координат. При моделировании исследовался асинхронный двигатель 4АХБ2П100L4 с паспортными данными: $P_{\text{ном}} = 4$ кВт, $p = 2$: $I_{\text{ном}} = 8,7$ А, $n_{\text{ном}} = 1420$ об/мин, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,81$, $\eta_{\text{ном}} = 0,81$ и параметрами схемы замещения: $R_1 = 1,35$ Ом, $R_2 =$

1,39 Ом, $X_1 = 2,13$ Ом, $X_2 = 2,3$ Ом, $X_{\mu} = 86$ Ом (непонятно – задавались приблизительно или как-то вычислили?). Моделирование процесса самовозбуждения АГ моделировалось для следующих начальных условий: наличие остаточного магнетизма в роторе генератора при отсутствии предварительного заряда конденсатора; отсутствие остаточного магнетизма, зато по крайней мере один из возбуждающих конденсаторов предварительно заряжен до некоторого значения.

В [13] сделан вывод, что величина потока остаточного магнетизма оказывает значительное влияние на ход процесса самовозбуждения. Чем больше напряжение предварительно заряженного конденсатора, тем процесс самовозбуждения протекает быстрее, а время процесса сокращается. Хотя и так понятно, что если процесс протекает быстрее, то и время процесса сокращается! Авторы [13] выделяют на переходной характеристике так называемую «мертвую зону» – временной интервал, возникающий в начале процесса самовозбуждения АГ, на протяжении которого значение выходного напряжения $U_f = 0$.

Интересный вывод, если учесть, что у нас есть остаточная намагниченность, которая дает на фазах АГ мощностью 1 кВт, даже до подключения конденсаторов возбуждения от 3 до 5 В. Непонятно, а как вообще оценивается наступление самовозбуждения АГ, если напряжение на обмотках статора равно нулю?. Мертвая зона, согласно [13], и определяет время переходного процесса. Эта зона обратно пропорциональна, не только остаточному намагничиванию АГ и предварительному заряду на конденсаторе возбуждения, но и величине ёмкости возбуждения, но и скорости вращения АГ.

Согласно [13] мертвую зону можно трактовать как время от включения возбуждающего конденсатора до начала возбуждения, т.е. когда напряжение на фазах статора АГ начинает отличаться от минимального уровня или же когда напряжение на фазах статора достигнет установившегося значения. Однако далее в [13] показывается зависимость между величиной мертвой зоны и временем включения основной ёмкости возбуждения, которая носит практически линейно возрастающий характер. Но это и так понятно, чем позже происходит включение возбуждающей ёмкости, тем позже возбуждётся АГ. Причем, график начинается в точке $t_{\text{вкл}} = 0$ с, $t_{\text{м.з.}} = 2,4$ с. Следовательно, это и есть значение «мертвой зоны», которое не зависит от времени включения ёмкости.

В [14] приведена компьютерная модель АГ с конденсаторным самовозбуждением и с учетом нелинейности кривой намагничивания. Дифференциальные уравнения АГ записывались в неподвижной системе координат α , β . Учет нелинейности кривой намагничивания осуществляется с помощью её аппроксимации полиномом 7-го порядка (27) полученного в пакете MATLAB.

$$\psi = 0,059i_{\mu}^7 - 0,004i_{\mu}^6 + 0,459i_{\mu}^5 + 0,023i_{\mu}^4 - 1,207i_{\mu}^3 - 0,036i_{\mu}^2 + 1,86i_{\mu} + 0,05, \quad (27)$$

где ψ – потокосцепление воздушного зазора, i_{μ} – намагничивающий ток.

Приводятся также схема замещения АГ (рис.14) и структурная схема АГ с конденсаторами возбуждения (рис. 15), где обозначено U_f – выходное напряжение АГ; $r_{\text{н}}$, $L_{\text{н}}$ – активное сопротивление и индуктивность нагрузки соответственно; – ток и ёмкость конденсаторов возбуждения; r_1 , $L_{\sigma 1}$ – активное сопротивление и индуктивность рассеивания статора; r_2 , $L_{\sigma 2}$ – активное сопротивление и индуктивность рассеивания ротора; ω_p – скорость вращения ротора. При расчете параметров структурной схемы в качестве АГ взяли асинхронную машину 4A100LY3 мощностью $P_{\text{н}} = 4$ кВт, номинальной частотой вращения $n_{\text{н}} = 1420$ об/мин. Ёмкость конденсатора возбуждения (схема

включения конденсаторов не указывается) $C = 24$ мкФ. (Вообще-то для двигателя с мощностью 4 кВт – очень небольшая ёмкость!).

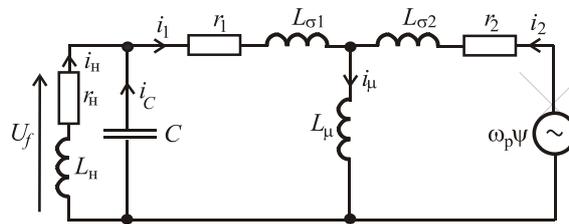


Рисунок 14 Схема замещения АГ

Однако в [14] не приводятся больше никакие численные значения параметров, поэтому работоспособность структурной схемы проверить затруднительно. На представленных графиках переходных процессов, ток и скорость даны почему-то в относительных единицах, скорость вращения ротора при возбуждении достигает 50 % превышения над номинальным значением, а потом в зоне устойчивого возбуждения выходит на номинальный уровень, что удивительно. Получается, что двигатель возбуждись в генераторном режиме, возвращается в двигательный режим, при этом сохраняя возбуждение. Также удивителен и фронт нарастания скорости вращения ротора. Если вал (ротор) АГ вращается за счет внешнего двигателя, то фронт нарастания должен быть прямолинейным (вал – чистый интегратор), а не как у колебательного звена второго порядка.

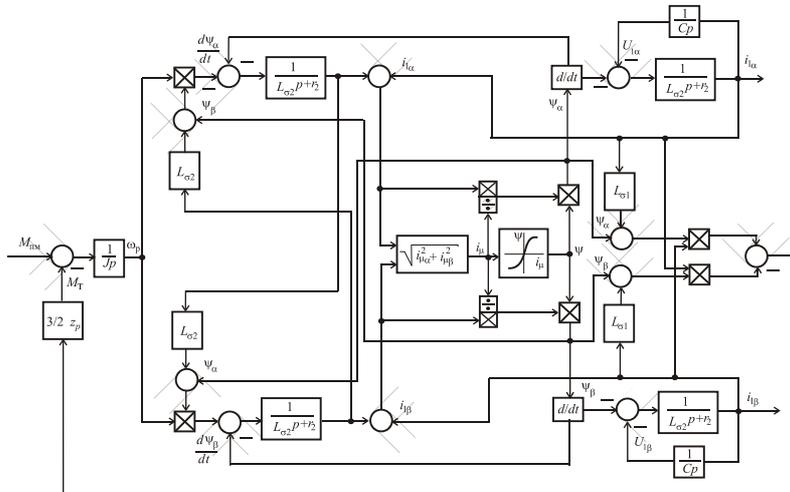


Рисунок 15 – Структурная схема АГ с конденсаторным возбуждением

В [15] приводится система уравнений для автономного АГ (симметричная асинхронная машина) для оценки характера протекающих в ней переходных процессов удобно использовать уравнения равновесия в системе координат, неподвижных по отношению к ротору, в которой $U_1 = Ue^{j\omega t}$.

$$\begin{cases} i_1 R_1 + (p + j\omega_2)\psi_1 = U_1; \\ i_2 R_2 + p\psi_2 = U_2 = 0. \end{cases} \quad (28)$$

После преобразований получаем уравнение

$$i_1 [R_1 + (p + j\omega_2)L_1(p)] = U_1, \quad (29)$$

где ω_2 – скорость вращения ротора

$$\begin{cases} L(p) = L_1 - \frac{pL_m^2}{R_2 + pL_2} = L' \frac{p + \alpha_2'}{p + \alpha_2} \\ L' = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \approx L_{1\sigma} + L_{2\sigma} = L_{\kappa} \\ \alpha_2 = \frac{R_2}{L_2}, \approx \frac{R_2}{L_{\kappa}}; \alpha_2' = \frac{R_2}{L_2} \end{cases} \quad (30)$$

Характеристическое уравнение системы (28)

$$f(p) = p^2 + p(\alpha_1 + \alpha_2 + j\omega_2) + \alpha_1\alpha_2 + j\omega_2\alpha_2 = 0.$$

Далее делается вывод, что асинхронную машину можно рассматривать как апериодическое звено первого порядка.

В [16] утверждается, что частота колебаний контура на рис.16 будет равна $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, (хотя в теории частота свободных колебаний R-L-C цепи

$\omega_{\text{св}} = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$, где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\delta = \frac{R}{2L}$).

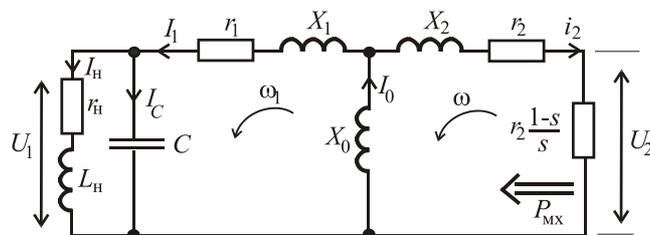


Рисунок 16 – Схема замещения фазы автономного генератора при нагрузке

АГ при приведении обмотки ротора к обмотке статора эквивалентен трансформатору с первичной цепью в роторе и вторичной в статоре. Входным генерирующим элементом такого трансформатора является так называемое вносимое сопротивление $r_2 \frac{1-s}{s} < 0$ при $s < 0$, на которое поступает мощность приводного двигателя, равная $P_{\text{мх}} = M\omega$, где M – момент приводного двигателя, а ω – его скорость. В схеме замещения как в физической модели генератора входная механическая мощность $P_{\text{мх}}$ заменяется его тепловым эквивалентом $r_2 I_2^2 \frac{1-s}{s} = U_2 I_2$ в сопротивлении $r_2 \frac{1-s}{s}$.

Следующее выражение устанавливает связь между механическими и электрическими величинами в роторе

$$P_{\text{мх}} = M\omega = r_2 I_2^2 \frac{1-s}{s} = U_2 I_2. \quad (31)$$

Здесь U_2 рассматривается как некоторое условное входное напряжение или первичное напряжение источника с внутренним сопротивлением $r_2 \frac{1-s}{s}$ и $U_2 = r_2 I_2 \frac{1-s}{s}$.

Активный характер механической мощности и её электрического аналога $P_{\text{мх}} = U_2 I_2$ определяет совпадение по фазе входных величин напряжения U_2 и тока I_2 , следовательно, полное (эквивалентное) сопротивление всей цепи АГ по отношению к U_2 должно быть чисто активным

$$Z_{\text{Э}} = r_2 + jX_2 + \frac{j_m (Z + r_1 + jX_1)}{Z + r_1 + jX_1 + jX_m} = R_{\text{Э}}, \quad (32)$$

где r_1, r_2, X_1, X_2, X_m – параметры асинхронной машины. Полное сопротивление $Z = \frac{-jX_C Z_{\text{н}}}{Z_{\text{н}} - jX_C} = r - jX$ с учётом нагрузки $Z_{\text{н}} = r_{\text{н}} + jX_{\text{н}}$ и конденсатора с сопротивлением $X_C = \frac{1}{\omega_0 C}$.

$$r = \frac{X_C^2 r}{r_{\text{н}}^2 + (X_{\text{н}} - X_C)^2}, \quad X = X_C \frac{r_{\text{н}}^2 - X_{\text{н}} X_C + X_{\text{н}}^2}{r_{\text{н}}^2 + (X_{\text{н}} - X_C)^2}.$$

Изменение нагрузки $Z_{\text{н}}$ или ёмкости C в переходном процессе нарушает условие (32), 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 АГ, происходит уменьшение намагничивающего тока $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ и размагничивание системы. В [16] предполагается, что с ростом активной части нагрузки увеличивается и уравновешивающий её момент приводного двигателя и ток \dot{I}_2 . В АГ нет такого сдерживающего фактора как напряжение сети и поэтому с ростом нагрузки происходит значительное размагничивание его, увеличивается индуктивность. Это ведёт к снижению частоты колебаний контура $L-C$, скорости вращения поля статора, напряжения U_1 на выходе генератора. При постоянной скорости вала приводного двигателя увеличивается (в отрицательном направлении) скольжение s и уменьшается частота тока в статоре.

В [17] указывается, что с точки зрения сохранения номинального КПД и ограничения нагрева номинальное скольжение АГ должно соответствовать номинальному скольжению асинхронного двигателя ($s = 0,02-0,05$). Также в [17] делается вывод, что в определенных условиях эксплуатации автономных источников электроэнергии применение АГ оказывается предпочтительным или даже единственно возможным решением, как, например, в высокоскоростных передвижных электростанциях с безредукторным газотурбинным приводом с частотой вращения $n = (9 \dots 15) 10^3$ об/мин. Для ротора с шихтованным сердечником и к.з. обмоткой типа «беличья клетка» допустимая окружная скорость не превышает 200–220 м/с, а для массивного ротора с продольными

пазами прямоугольного сечения безобмоточного, выполненного из цельной стальной поковки до 400 м/с. Другое эффективное применение АГ является их использование в мини-ГЭС при устойчивом режиме нагрузки.

Здесь же [17] приводятся данные гл.инж. Штефана А.М. (НК ЭМЗ, г. Новая Каховка) конденсаторный АГ типа АИРУ112-М2 при соединении батареи конденсаторов ёмкостью 3×120 мкФ в звезду возбуждается при скорости $n_p = 2133$ об/мин с напряжением $U_\phi = 60$ В и током фазы $I_\phi = 0,8$ А, а при соединении тех же конденсаторов в треугольник напряжение $U_\phi = 52$ В, $I_\phi = 1,4$ А при скорости $n_p = 1265$ об/мин.

В АГ серии АИМН90-Л4 при включении ёмкости 40 мкФ только в одну из фаз, возбуждение наступило при скорости $n_p = 1369$ об/мин с $U_\phi = 209$ В и $I_\phi = 1,29$ А, $f = 44$ Гц, а при ёмкости $C = 60$ мкФ параметры возбуждения были равны: $n_p = 1300$ об/мин с $U_\phi = 500$ В и $I_\phi = 6,49$ А, $f = 124$ Гц. При увеличении частоты вращения ротора до синхронной 1500 об/мин наблюдалось увеличение частоты тока до 400 Гц.

В некоторых случаях не удавалось добиться устойчивого возбуждения АГ даже при сверхсинхронной частоте вращения ротора. Например, для намагниченных гладких стального массивного и шихтованного роторов самовозбуждения не возникало при любых величинах присоединенной ёмкости.

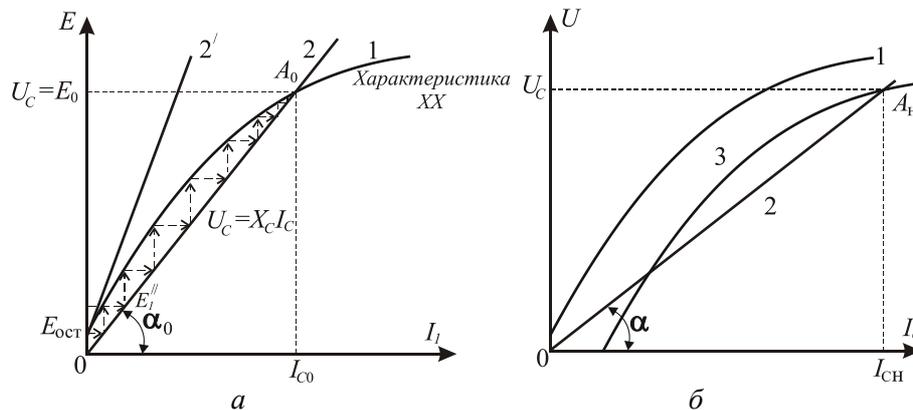


Рисунок 17 – Процесс самовозбуждения асинхронного генератора от конденсаторной батареи

Процесс самовозбуждения АГ в [17] рассматривается в рамках первой из рассмотренных выше гипотез, а именно происходит так же как у генератора постоянного тока, при условии наличия магнитного потока остаточного намагничивания $\Phi_{ост}$. При вращении ротора от приводного двигателя этот поток индуцирует в обмотке статора ЭДС $E_{ост} = (0,02 - 0,03) U_n$, которая вызывает в конденсаторах ток. Этот ток, будучи емкостным (опережающим), протекая по обмотке статора, подмагничивает АГ, усиливает $\Phi_{ост}$, что приводит к возрастанию ЭДС $E_{ост}$, дальнейшему росту тока и потока и т.д. (рис. 17, а). Окончание процесса самовозбуждения соответствует точке A_0 пересечения характеристики (1) холостого хода (ХХ) (характеристики намагничивания) АГ с вольт-амперной характеристикой конденсаторной батареи (2) ($I_c X_c$) при ЭДС E_0 и токе статора I_{c0} . Напряжение на генераторе зависит от ёмкости конденсаторов: чем меньше ёмкость C , тем больше угол α_0 . При малых значениях ёмкости $C_{кр}$ характеристика $I_c X_c$ (2') не пересекается с характеристикой холостого хода и генератор не возбуждается.

В ряде случаев начало процесса самовозбуждения АГ может быть обеспечено путём разряда на обмотку предварительно заряженной конденсаторной батареи.

Угол α_0 определяется из соотношения

$$\operatorname{tg}\alpha_0 = \frac{U_C}{I_{C0}} = \frac{X_{C0}I_{C0}}{I_{C0}} = X_{C0} = \frac{1}{\omega_1 C_0}. \quad (33)$$

Самовозбуждение АГ под нагрузкой требует увеличения ёмкости С, что хорошо иллюстрирует рис. 17, б, где кривая 3 – это нагрузочная характеристика АГ. Точка A_H – точка окончания самовозбуждения. При этом

$$\operatorname{tg}\alpha_H = \frac{U_C}{I_{CH}} = \frac{X_{C0}I_{C0}}{I_{C0}} = X_{CH} = \frac{1}{\omega_1 C_H}. \quad (34)$$

Поскольку $\operatorname{tg}\alpha_0 > \operatorname{tg}\alpha_H$, то $C_H > C_0$.

$$X_c = \frac{1}{\omega_1 C} = \frac{U_C}{I_C} = \frac{m_1 U_C^2}{Q_C}, \quad (35)$$

тогда

$$C = \frac{Q_C}{m_1 \omega_1 U_C^2} = \frac{P_H (\operatorname{tg}\phi_\Gamma + \operatorname{tg}\phi_H)}{m_1 \omega_1 U_C^2}, \quad (36)$$

где Q_C – реактивная мощность конденсаторов, которая определяется суммой реактивных мощностей генератора и нагрузки, P_H – активная мощность нагрузки $\operatorname{tg}\phi_\Gamma$ и $\operatorname{tg}\phi_H$ – углы вольт-амперных характеристик конденсаторов на холостом ходу АГ и при нагрузке.

Из последнего выражения видно, что при изменении нагрузки АГ ёмкость конденсаторов необходимо регулировать. Масса и размеры конденсаторной батареи, необходимой для автономного АГ, как правило, могут превосходить массу АГ и только при $\cos \phi_H = 1$ масса конденсаторов сопоставима с массой АГ. (что весьма сомнительно!).

По формуле (36) получается, если использовать один конденсатор, т.е. $m_1 = 1$ и взять заведомо самые минимальные углы ϕ_H и ϕ_Γ в 25° – 30° , то на киловаттный генератор нужно ёмкость для возбуждения 65 мкФ при частоте $\omega_1 = 314$ рад/с, а если допустить, что возбуждение происходит в районе 1500 об/мин ≈ 157 рад/с, то тогда вообще 130 мкФ! Хотя удастся возбудить АГ мощностью 1 кВт конденсатором гораздо меньшей ёмкости.

Отечественные конденсаторы имеют такие массогабаритные показатели $m_{уд} = 0,32$ кг/кВт, а с учетом конструктивных факторов $m_{уд} = 0,65$ кг/кВт. У плёночных полипропиленовых конденсаторов типа ПЖ и ПТ $m_{уд} = (0,1-0,2)$ кг/кВт при $f = 400$ Гц и $m_{уд} = (0,4-0,5)$ кг/кВт при $f = 50$ Гц.

Выводы:

1) до сих пор нет единого мнения в литературе относительно причины самовозбуждения АГ. Традиционно рассматривают этот процесс подобно самовозбуждению генератора постоянного тока. Другие гипотезы (версии) рассматривают его как параметрический резонанс в цепи с ёмкостью и индуктивностью и (или) как процесс автоколебаний в колебательном контуре;

2) рассуждения о физических аспектах процесса АГ, а также математические выкладки для обоснования той или иной точки зрения практически никогда не имеют подтверждения в виде эксперимента на реальном оборудовании, в лучшем случае это компьютерное моделирование с не вполне очевидными параметрами, т.е. нет логической цепочки «гипотеза – эксперимент – проверка (корректировка) гипотезы – математическая модель – сопоставление результатов компьютерного и физического моделирования – корректировка математической модели – (достоверная версия), т.е. теория». Совпадение теоретических объяснений явления (гипотез) с экспериментальными данными создает научную теорию согласно общепринятой научной методологии.

3) крайне редко или практически не приводятся в литературе данные по кривым намагничивания (характеристикам холостого хода) АГ;

4) схема замещения АГ и дифференциальные уравнения хорошо и давно известны, однако в разных источниках схемы замещения отличаются, в частности, участок цепи ротора;

5) структурная схема АГ в виде динамических звеньев появляется в публикациях относительно недавно и её структура в разных публикациях также сильно различается;

6) проверка работоспособности приведенных в литературе структурных схем осложняется отсутствием значений параметров в соответствующих публикациях;

7) указывается неоднозначность насыщения магнитной системы и остаточного намагничивания АГ для целей возбуждения.

8) теоретически не обоснованы значения частоты вращения ротора при которых начинается возбуждение АГ;

9) нигде не говорится о взаимоиндуктивности обмоток статора;

10) нет относительно «удобных» формул для определения ёмкости возбуждения АГ, чтобы сходу оценить ёмкость конденсатора возбуждения, например, по мощности асинхронной машины и другим параметрам.

Литература

1. Пиотровский Л.М. Электрические машины. –Л.: – М.: Госэнергоиздат, 1950, – 528 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов/ И.П.Копылов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш.шк., 2002. – 607 с.
5. Бохан С.К. Емкостное самовозбуждение асинхронного генератора // Известия академии наук. Энергетика и транспорт. №2, 1977, с. 39–46.
6. Бояр-Сазонович Асинхронные генераторы. Свойства и перспективы // Электротехника 1990, № 10, с. 55–57.
7. Каримов А.С., Хо Тхань Хиеп О параметрическом самовозбуждении асинхронного генератора// Электротехника, 1992, № 6–7, с. 5–7.
8. Гарганеев А.Г., Падалко Д.А. О самовозбуждении электрических машин с позиций теории автоматического управления // Электротехника, № 2, Доклады ТУСУРА, том.19, с. 94–98.
9. Китаев А.В., Орлов И.Н. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины// Электричество, 1978, – № 4, с. 47–51.

10. Нетушил В.А. К расчету режима самовозбуждения автономного асинхронного генератора // Электричество, 1978, – № 4, с. 52–55.
11. Джендубаев А.-З.Р. Математическое моделирование автономного асинхронного генератора с полым немагнитным ротором с учетом остаточной индукции статора // Изв.вузов. Электромеханика, 2006, – № 1, с. 28–31.
12. Джендубаев А.-З.Р. Особенности самовозбуждения автономных генераторов. Ч.2. Асинхронный генератор // Электричество, 2006, – № 12, с. 25–31.
13. Ченчевой В.В., Родькин Д.И, Черный А.П., Юдина Г.Г. Особенности самовозбуждения автономного асинхронного источника электроэнергии на базе асинхронного генератора.
14. Клепиков В.Б., Колотило В.І., Моисеев О.М., Банев Є.Ф. Дослідження процесів самозбудження в електромеханічній системі «детандер – асинхронний генератор – інвертор» // Електроінформ, 2007, – №2, с. 6–8.
15. Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов. Под ред. И.М. Постникова, – К., «Наукова думка», 1977.
16. Мишин В.И., Козырский В.В., Каплун В.В., Кулинич А.Н., Макаревич С.С. Компенсированный асинхронный генератор для автономных систем электроснабжения // Електротехніка і електромеханіка, 2007, – № 2, с.42–47.
17. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэнергетика / В.С.Кривцов, А.М. Алейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.аэрокосм. ун-т «Харьк.авиаци. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2003. – 400 с.
18. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветроэнергетика / В.С.Кривцов, А.М. Алейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.аэрокосм. ун-т «Харьк.авиаци. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2004. – 519 с.

Bibliography (transliterated)

1. Piotrovsky L.M. Elektricheskie mashiny. – L., – M.: Gosenergoizdat, 1950, – 528 p.
2. Voldek A.I. Elektricheskie mashiny. 2-e izd. – L.: Energia, 1978.
3. Ivavov-Smolenskiy Elektricheskie mashiny: Uchebnik dlya vuzov. – M.: Energiya, 1980. – 928 p.
4. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny: Uchebnik dlya vuzov. – 3-e izdanie. ispr. – M.: Vysh. Shk., 2002. – 607 p.
5. Bohyan S.K. Emkostnoe samovozbuzhdenie asinhronnogo generatora // Izvestiya akademii nauk. Energetika i transport. #2, 1977, p. 39–46.
6. Boyar-Sazonovich Asinhronnyie generatoryi. Svoystva i perspektivy // Elektrotehnika 1990, # 10, p. 55–57.
7. Karimov A.S., Ho Than Hiep O parametricheskom samovozbuzhdenii asinhronnogo generatora// Elektrotehnika 1992, # 6–7, p. 5–7.
8. Garganeev A.G., Padalko D.A. O samovozbuzhdenii elektricheskikh mashin s pozitsiy teorii avtomaticheskogo upravleniya // Elektrotehnika, # 2, Doklady TUSURA, tom.19, p. 94–98.
9. Kitaev A.V., Orlov I.N. O fizicheskom mehanizme samovozbuzhdeniya asinhronnoy mashiny// Elektrichestvo, 1978, #4, p. 47–51.
10. Netushil V.A. K raschetu rezhima samovozbuzhdeniya avtonomnogo asinhronnogo generatora // Elektrichestvo, 1978, #4, p. 52–55.
11. Dzhendubaev A.-Z.R. Matematicheskoe modelirovanie avtonomnogo asinhronnogo generatora s polyim nemagnitnyim rotorom s uchetom ostatochnoy induktsii statora // Izv.vuzov Elektromehaniка, 2006, #1. p. 28–31.

12. Dzhendubaev A.-Z.R. Osobennosti samovozbuzhdeniya avtonomnyih generatorov. Ch.2. Asinhronnyiy generator // *Elektrichestvo*, 2006, # 12, p. 25–31.
13. Chenchevov V.V., Rodkin D.I, Cherniy A.P., Yudina G.G. Osobennosti samovoz-buzhdeniya avtonomnogo asinhronnogo istochnika elektroenergii na baze asinhronnogo generatora.
14. Klepikov V.B., Kolotilo V.I., Moiseev O.M., Banev E.F. Doslidzhennya protsesiv samozbudzhennya v elektromehanichniy sistemi «detander – asinhronnyiy generator – invertor» // *Elektroinform*, 2007, #2, p. 6–8.
15. Teoriya i metodyi rascheta asinhronnyih turbogeneratorov. Pod red. I.M.Postnikova, – K., «Naukova dumka», 1977.
16. Mishin V.I., Kozyirskiy V.V., Kaplun V.V., Kulinich A.N., Makarevich S.S. Kompensirovannyiy asinhronnyiy generator dlya avtonomnyih sistem elektrosnabzheniya // *Elektrotehnika i elektromehanika*, 2007, # 2, p. 42–47.
17. Neischerpaemaya energia. Book 1. Vetroelectrogenerator/ V.S.Krivstov, A.M. Aleinikov, A.I. Yakovlev. – Uchebnik. – Kharkov: Nats.aerocosm. un-t «Khark.aviats. in-t», Sevastopol: Sevast.nats.tekh.un-t, 2003. – 400 p.
18. Neischerpaemaya energia. Book 2. Vetroelectrogenerator / V.S.Krivstov, A.M. Aleinikov, A.I. Yakovlev. – Uchebnik. – Kharkov: Nats.aerocosm. un-t «Khark.aviats. in-t», Sevastopol: Sevast.nats.tekh.un-t, 2004. –519 p.

УДК 621.316.91

Марков В.С.

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ГІПОТЕЗ САМОЗБУДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

В статті розглянуті сучасні гіпотези самозбудження автономних асинхронних генераторів. Існують три основні гіпотези самозбудження – збудження аналогічне збудженню генератора постійного струму за рахунок остаточного магнетизму у роторі, параметричний резонанс у електричному колі без наявного джерела електрорушійної сили, а також автоколивальний процес у системі «ємність – асинхронний генератор». Недоліком всіх гіпотез є відсутність експериментального підтвердження.

Markov V.S.

OVERVIEW AND ANALYSIS OF MODERN HYPOTHESES OF ASYNCHRONOUS GENERATORS SELF-EXCITATION

In the article modern hypotheses of asynchronous generators self-excitation have been considered. There three hypotheses are excitement like direct-current generators due to the residual magnetic flux, a parametric resonance in a circuit without an obvious source of electromotive force, auto-oscillations in the system “capacitance – asynchronous generator”.

Disadvantage of all hypotheses is the lack of experimental verification.