УДК 621.313; 621.314

А.Г. Гарганеев, Д.А. Падалко

О самовозбуждении электрических машин с позиций теории автоматического управления

Представлены результаты анализа электромеханических генераторов постоянного и переменного тока с самовозбуждением с позиций теории автоматического управления. Показана общность условий самовозбуждения асинхронного генератора и генератора постоянного тока. Получены уточненные выражения, определяющие условия самовозбуждения генераторов, а также условия предельных режимов по нагрузке. Обосновано параметрическое возбуждение асинхронного генератора в мехатронной системе с автономным инвертором напряжения.

Ключевые слова: самовозбуждение, генератор, баланс фаз, баланс амплитуд, система генерации, инвертор.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-2-94-98

В системах генерации электрической энергии (СГЭЭ) на стационарных наземных и автономных объектах широкое применение находят электрические машины постоянного и переменного тока. Выбор типа электрической машины в конкретной СГЭЭ определяется различными факторами – стоимостью, КПД, надежностью и долговечностью работы, массогабаритными показателями, способностью выполнения защитных функций, условиями окружающей среды и т.п. Особым классом электрических машин являются генераторы с самовозбуждением, в которых создаются условия генерации электроэнергии без предварительного (принудительного) создания магнитных полей возбуждения – магнитная энергия возбуждения производится самим генератором.

Постановка задачи

Условия самовозбуждения генераторов – постоянного тока (ГПТ) и асинхронных (АГ), приводятся в различных учебниках и монографиях по электрическим машинам, например в [1–3], однако их вывод, как правило, похож один на другой и выполнен упрощенно на основе эвристических методов. Между тем электромеханическим системам, способным к самовозбуждению, присущи те же принципы устойчивости (баланс фаз и амплитуд, наличие положительной обратной связи и соответствующего петлевого усиления, критерии устойчивости и т.п.), что и для систем иной физической природы [4]. При этом процесс возникновения и ограничения автоколебаний в генераторе может быть проанализирован на основе структурных схем, являющихся фактически операторной формой системы дифференциальных уравнений электрической машины, при наличии нелинейного звена – магнитной цепи с насыщением («статор–воздушный зазор–ротор»).

Условия самовозбуждения в ГПТ

Электромагнитные процессы в ГПТ параллельного возбуждения при «бесконечно большой» мощности и постоянстве скорости приводного двигателя в соответствии с рис. 1, а выражаются системой дифференциальных уравнений (1):

$$u_B = R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt},$$

$$u_Y = c_e \Phi \omega_Y - R_Y i_Y - L_Y \frac{di_Y}{dt}, \quad (1)$$

$$\Phi = i_B w_B / R_M.$$

при $u_Y = u_B = i_Y R_Y$, $E_Y = c_e \Phi \omega_Y$, $\omega_Y = \omega_{вр}$, где w_B – число витков обмотки возбуждения, R_M – магнитное сопротивление цепи «индуктор–воздушный зазор–якорь».

Уравнениям (1) соответствует структурная схема, представленная на рис. 1. В соответствии с принципом действия ГПТ и структурной схемой наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{ост}$ приводит при вращении якоря к возникновению ЭДС E_Y на выходе генератора. В обмотке возбуждения с числом витков w_B , представленной апериодическим звеном $W_4 = k_B / (1 + T_B p)$, возникает ток возбуждения, который создает МДС F и соответствующий магнитный поток Φ . Таким образом, образуется контур положительной обратной связи по магнитному потоку, способствующий процессу самовозбуждения. Амплитуда потока и ЭДС ограничивается за счет нелинейности характеристики намагничивания $\Phi(F)$. Как и в схемах с самовозбуждением, представленный процесс характеризуется балансом фаз и амплитуд. Что касается баланса амплитуд, то он выполняется при петлевом коэффициенте усиления, равном единице и может быть получен из выражений общей передаточной функции системы [см. выражение (2)]. Баланс фаз в ГПТ фактически отсутствует, так как коллектор, выполняющий функцию «модулятора–демодулятора», превращает переменную в якоре ЭДС в постоянную.

В соответствии с правилами преобразования структурных схем и при значениях передаточных функций звеньев

$$W_1 = c_e \omega_{вр} = k; \quad W_2 = \frac{1 + T_Y p}{k_Y} \approx R_Y \text{ при } k_Y = 1/L_Y; \quad T_Y = L_Y/R_Y;$$

$$W_3 = 1/R_Y; \quad W_4 = \frac{k_B}{1 + T_B p} \text{ при } k_B = 1/R_B;$$

$$W_5 = w_B \Phi(F) = k_T = L_T$$

имеем результирующую передаточную функцию

$$W_{ГПТ} = \frac{W_1}{1 + W_2(W_3 + W_4) - W_1 W_4 W_5} \quad (2)$$

и общее условие самовозбуждения

$$W_1 W_4 W_5 - W_2 (W_3 + W_4) \geq 1. \quad (3)$$

После подстановки и преобразований получаем условие самовозбуждения ГПТ в параметрах:

$$c_e \omega_{вр} w_B L_{\Gamma} \geq (R_B + L_B p) \left(1 + \frac{R_{\Gamma}}{R_H} \right) + R_{\Gamma}. \quad (4)$$

Составляющая $c_e \omega_{вр} w_B L_{\Gamma} = X_{ГПТ}$ является полным индуктивным сопротивлением ГПТ, а фактически отражает характеристику холостого хода генератора $E_{\Gamma} = f(i_B)$. При установившемся режиме колебаний при $t \rightarrow \infty$ ($p \rightarrow 0$) и пренебрежении R_{Γ} относительно R_H получаем упрощенные условия

самовозбуждения ГПТ, представленные в учебниках по электрическим машинам: «сопротивление обмотки возбуждения должно быть не менее определенного критического значения». Как было отмечено ранее, эвристически сформулированное авторами учебников условие самовозбуждения ГПТ исходило из того факта, что прямая, характеризующая омическую цепь обмотки возбуждения, должна находиться ниже характеристики холостого хода (рис. 2). Полученное условие (4) уточняет физические основы самовозбуждения ГПТ.

Рис. 1. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы ГПТ

Рис. 2. Самовозбуждение ГПТ: а – самовозбуждение при различных «внешних» сопротивлениях относительно ЭДС: 1 – критическое значение сопротивления; 2 – вольтамперная характеристика обмотки возбуждения; А – рабочая точка ГПТ; б – процесс самовозбуждения при моделировании схемы по рис. 1

Из выражения (4) также следует, что при увеличении нагрузки ГПТ до определенного значения режим генерации прекращается. При этом сопротивление нагрузки должно быть не менее значения, определяемого выражением (5):

$$R_H \geq \frac{R_B R_{\Gamma}}{X_{ГПТ} (R_H) - R_B - R_{\Gamma}}. \quad (5)$$

Составляющая $X_{ГПТ} (R_H)$ отражает дополнительную зависимость индуктивного сопротивления ГПТ, обусловленную размагничивающим действием реакции якоря (см. пунктирную линию на рис. 1).

Условия самовозбуждения в АГ

В АГ происходит фактически тот же процесс, что и в ГПТ. Однако для выполнения баланса фаз в

статорной цепи переменного тока необходимо получить емкостную составляющую тока I_C , которая в цепи ротора «поддержит» развитие магнитного потока. Известно, что в АГ емкостную составляющую получают за счет батареи конденсаторов, однако существует и принципиальная возможность использовать для этой цели автономный инвертор [5].

Электромагнитные процессы в симметричном АГ с конденсаторами возбуждения выразим системой уравнения (6) при допущениях:

- приводной двигатель имеет «бесконечно большую» мощность и постоянную скорость;
- на процесс возбуждения (баланс фаз и амплитуд) оказывают влияние реактивные элементы – индуктивные сопротивления цепи намагничивания,

рассеяния статора $X_{\sigma 1}$ и полного сопротивления нагрузки Z_H , емкостное сопротивление возбуждающих конденсаторов X_C ;

– сопротивление ротора $\{[R_2(S)] (Z_H)\} \gg Z_H$, где S – скольжение;

$$\begin{aligned} i_C &= C \frac{du_C}{dt}, \\ i_{CT} &= i_C + i_H, \\ u_H &= u_C = \frac{d\psi_{CT}}{dt} - i_{CT} R_{CT} - L_{\sigma 1} \frac{di_{CT}}{dt}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнениям (6) соответствует структурная схема «на фазу», представленная на рис. 3. Следует отметить, что замена оператора дифференцирования на оператор Фурье с разложением передаточной

функции на мнимую и действительную части (что подобно переходу в α - β -координаты) позволяет проводить анализ годографа системы и устойчивости.

В соответствии с принципом действия АГ и структурной схемой наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{ост}$ приводит при вращении ротора к возникновению ЭДС E_r . В обмотке статора с числом витков w_{CT} , за счет выходных конденсаторов, возникает емкостной ток возбуждения, который создает МДС F и соответствующий магнитный поток Φ . Таким образом, образуется контур положительной обратной связи по магнитному потоку, способствующий процессу самовозбуждения. Амплитуда потока и ЭДС ограничивается за счет нелинейности характеристики намагничивания $\Phi(F)$ АГ.

Рис. 3. Структурная схема АГ

Используя результирующую передаточную функцию и условия, аналогичные (2) и (3), а также аналогичные обозначения W_i в структурных схемах рис. 1 и 3, после преобразований при пренебрежении R_{CT} получим условие самовозбуждения АГ в параметрах:

$$c_l \omega_{вр} w_{CT} L_{\Gamma} \geq X_C \left(1 + \frac{X_{\sigma 1}}{Z_H} \right) + X_{\sigma 1}. \quad (7)$$

Составляющая $c_e \omega_{вр} w_{CT} L_{\Gamma} = X_{AG}$ является индуктивным сопротивлением АГ, а фактически отражает характеристику холостого хода генератора $E_r = f(i_C)$.

Из выражения (7) также следует, что при увеличении нагрузки АГ до определенного значения режим генерации прекращается. При этом сопротивление нагрузки должно быть не менее значения, определяемого выражением (8):

$$Z_H \geq \frac{X_C X_{\sigma 1}}{X_{AG}(Z_H) + X_{\sigma 1} - X_C}. \quad (8)$$

Составляющая $X_{AG}(Z_H)$ отражает дополнительную зависимость индуктивного сопротивления АГ, обусловленную размагничивающим действием реакции якоря (см. пунктирную линию на рис. 3). При этом за счет изменения индуктивного сопротивления АГ частота выходного напряжения изменяется, что фактически означает появление скольжения в АГ при нагрузке. На рис. 4 поясняется процесс самовозбуждения АГ по аналогии с рис. 2.

На рис. 5 представлен результат анализа АГ в частотной области в виде амплитудно-фазочастотной характеристики (АФЧХ). Как следует из графика АФЧХ, резонанс (самовозбуждение) АГ 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, как было отмечено выше, 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 АГ. Представленный анализ согласуется с результатами исследований, проведенных в [6].

На рис. 6, а представлена СГЭЭ на основе АГ с автономным инвертором напряжения, выступающего в качестве «поставщика» емкостного тока генератора. На диаграммах рис. 6 приведены временные зависимости, деления нанесены через промежуток времени, соответствующие 50 мс.

Поскольку в асинхронной машине, представленной в библиотеке Simulink Matlab, отсутствует модуляция от зубцовых гармоник и остаточная намагниченность, вычислительный эксперимент был выполнен следующим образом. Изначально на конденсаторе в цепи постоянного тока инвертора было задано постоянное напряжение и асинхронная ма-

шина разгонялась в режиме двигателя. Далее двигатель за счет внешнего момента переходил в режим

АГ при поступлении тока возбуждения от инвертора, поддерживая напряжение на конденсаторе.

Рис. 4. Самовозбуждение АГ: а – самовозбуждение при различных «внешних» сопротивлениях относительно ЭДС: 1 – критическое значение сопротивления; 2 – вольтамперная характеристика конденсаторной батареи; б – процесс самовозбуждения при моделировании схемы по рис. 3

Рис. 5. Амплитудно-фазочастотные характеристики АГ: а – годограф; б – мнимая Im и действительная Re части

Следует отметить, что в АГ ввиду наличия двух типов накопителей энергии – емкости и индуктивности, возможно возникновение параметрического резонанса, показанного, например, в работе [6].

Представленные выше структурные схемы также не противоречат этому факту, поскольку для возникновения колебаний согласно условию (4) вовсе не требуется остаточный магнитный поток. Суть параметрического возбуждения состоит в том, чтобы при начальном потенциальном запасе энергии в системе изменять по величине один из накопителей.

Удобнее, когда изначально заряжен конденсатор, а индуктивность меняется, например, полупроводниковым ключом. В [7, 8] показано, что для возникновения параметрического резонанса в L-C-контуре должно соблюдаться условие (9):

$$\frac{\Delta L}{L} > \frac{\pi}{Q}, \quad (9)$$

где Q – добротность контура.

Рис. 6 (начало)

Рис. 6 (окончание). СГЭЭ на основе АГ: *а* – имитационная модель с автономным инвертором напряжения; временные осциллограммы; *б* – скорость ротора; *в* – электромагнитный момент; *г* – ток АГ

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

Заключение

Представленные результаты исследований показывают, что процессы возникновения колебаний, как и формы математических выражений в самовозбуждающихся типах электромеханических генераторов, аналогичны. Уточненные условия самовозбуждения электромеханических генераторов, полученные на основе подхода к электрической машине, как системе автоматического управления, при упрощении совпадают с условиями самовозбуждения, полученными эвристически и представленными в классической теории электрических машин.

Литература

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы автономных систем. – М.: Знак, 1998. – 288 с.
4. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – Л.: Энергия, 1975. – 416 с.
5. Гентковски З. Процессы и характеристики автономных асинхронных генераторов с полупроводниковыми регуляторами напряжения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01. – СПб., 2000. – 255 с.
6. Самовозбуждение асинхронного генератора / А.В. Нетушил, С.П. Бояр-Сазонович, А.В. Китаев // Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – № 6. – С. 612–617.
7. Боярченко М.А., Черкашина А.Г. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. – М.: Высш. школа, 1976. – 383 с.

8. Физическое толкование параметрического резонанса / Н.Д. Бирюк, Ю.Б. Нечаев, В.Н. Финько // Вестник ВГУ. Сер. Физика. Математика. – 2005. – № 1. – С. 20–25.

Гарганеев Александр Георгиевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электротехнических комплексов и материалов (ЭКМ) Национального исследовательского Томского политехнического университета
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77
Эл. почта: garganeev@rambler.ru

Падалко Дмитрий Андреевич

Аспирант, ассистент каф. ЭКМ
Тел.: (382-2) 56-30-04
Эл. почта: padalko.da@gmail.com

Garganeev A.G., Padalko D.A.

On Self-Excitation of the Electrical Machine from the Perspective of the Automatic Control Theory

The results of the electromechanical self-excitation AC and DC generators analysis from the perspective of the automatic control theory are presented. Similarity of the self-excitation conditions of the asynchronous and DC generators is demonstrated. The expressions to determine the generator self-excitation conditions as well as limit load operation conditions are obtained. Parametric excitation of the asynchronous generator in the mechatronic system containing autonomous voltage inverter is demonstrated.

Keywords: self-excitation, generator, phase balance, amplitude balance, generation system, inverter.