



**СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрены вопросы моделирования и анализа статической устойчивости электроэнергетических систем на основе уравнений квазистационарных режимов синхронных машин на основе уравнений Парка–Горева. Разработана структурная схема диссипативной модели неявнополюсной синхронной машины без демпферных обмоток с автоматическим регулятором возбуждения, работающей на статическую нагрузку. Предложена диссипативная модель неявнополюсной синхронной машины без демпферных обмоток, работающей на асинхронную нагрузку. Рассмотрен практический пример диссипативной модели генератора, снабженного автоматическим регулятором возбуждения сильного действия, работающего на двигательную нагрузку. С помощью программного обеспечения получены осциллограммы переходных процессов.

Структурное моделирование, статическая устойчивость, электроэнергетическая система.

Электрическая система представляет собой сложную регулируемую систему, переходные процессы в которой описываются системой дифференциальных уравнений высокого порядка. Поэтому целесообразно прибегать к структурному изображению системы, в котором, в отличие от схемы замещения, внимание обращено на взаимную связь элементов (типовых звеньев), а не на их содержание.

Структурная схема позволяет выделить объект регулирования, регулятор, внутренние и внешние обратные связи, что делает более наглядным изучение влияния взаимодействия элементов системы на её устойчивость и переходные процессы. Одновременно структурные схемы выявляют ряд общих черт в задачах, которые будучи описаны в виде дифференциальных уравнений были бы незаметны, и не позволили бы установить некоторые общие закономерности. Применение структурных схем для анализа переходных процессов в электрических системах целесообразно ещё и по причине большого количества наработок программного продукта для структурного анализа процессов автоматически регулируемых технических систем [8].

Очевидно, что математическая модель должна быть адекватна тем физическим процессам, которые она описывает. Однако, чем выше степень адекватности, тем более сложна модель. В инженерной практике часто опираются на упрощенные математические модели, охватывающие наиболее существенные составляющие интересующего движения.

Очевидно, что электромагнитный момент генератора, момент турбины, ЭДС генератора, индуктивные со-

противления цепи статора генератора зависят от частоты в энергосистеме. Для схемы, изображенной на рис. 1, возможно построить математическую модель, используя уравнения квазистационарных режимов синхронных машин на основе уравнений Парка–Горева.

Математическая модель будет представлять собой систему уравнений, включающую уравнения напряжения и частоты в узле подключения нагрузки, а также уравнения напряжения на зажимах генератора. В результате имеем следующую систему уравнений [2, 5, 6]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{T_J}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} + M = M_T; \\ & \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_u; \\ & M = \frac{E_q I_q}{\omega} = f(E_q, I_q, \omega); \\ & M_T = W_{APC}(P)\omega = f(\omega); \\ & E_q = i_B K_H \omega = f(i_B, \omega); \\ & i_B = W_B(P)U_B + W_d(P)I_d = f(U_B, I_d); \\ & I_d = \frac{E_q}{\omega x_{d\Sigma 0}} - \frac{U}{\omega_u x_{d\Sigma 0}} \cos \delta = f(E_q, \omega, \delta, U, \omega_u); \\ & I_q = \frac{U}{\omega_u x_{d\Sigma 0}} \sin \delta = f(U, \delta, \omega_u); \\ & U = \frac{E_q R_H}{\omega x_{d\Sigma 0}} \sin \delta = f(E_q, \delta, \omega); \\ & \omega_u = R_H t g \delta \frac{x_{H0} \cdot x_{d\Sigma 0}}{x_{H0} + x_{d\Sigma 0}} = f(\delta); \\ & U_\Gamma = \sqrt{(E_q - I_d x_{d\Sigma 0} \omega)^2 + (U \sin \delta \frac{x_{d0}}{x_{d\Sigma 0}})^2} = f(E_q, I_d, \delta, \omega, U). \end{aligned} \right. \quad (1)$$

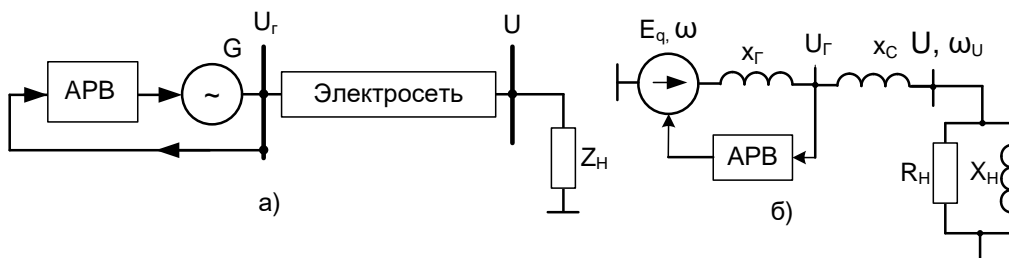


Рис. 1. Однолинейная схема и схема замещения генератора с APB, работающего на статическую нагрузку

Для построения структурной схемы запишем систему (1) в операторном виде в отклонениях. Приращение тока возбуждения запишем с учетом уравнения:

$$\Delta i_B = \frac{K_u K_y}{R_B(1+T_B P)} \cdot (-\Delta U_\Gamma) + \frac{K_3 P}{R_B(1+T_B P)} \Delta I_d. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_J}{\omega_0} P \Delta \omega = \Delta M_T - \Delta M; \\ P \Delta \delta = \Delta \omega - \omega_u; \\ \Delta M = \alpha_1 \Delta E_q + \alpha_2 \Delta I_q + \alpha_3 \Delta \omega; \\ \Delta M_T = -\frac{K_\omega}{1+T_\omega P}; \\ \Delta i_B = -\frac{K_u K_y}{R_B(1+T_B P)} \Delta U_\Gamma + \frac{K_H P}{R_B(1+T_B P)} \Delta I_d; \\ \Delta E_q = \alpha_4 \Delta \omega + K_H \omega_0 \Delta i_B; \\ \Delta I_d = \alpha_5 \Delta E_q + \alpha_6 \Delta \omega + \alpha_7 \Delta \delta + \alpha_8 \Delta U + \alpha_9 \Delta \omega_u; \\ \Delta I_q = \alpha_{10} \Delta U + \alpha_{11} \Delta \delta + \alpha_{12} \Delta \omega_u; \\ \Delta U = \beta_1 \Delta E_q + \beta_2 \Delta \delta + \beta_3 \Delta \omega; \\ \Delta \omega_u = \alpha_{13} \Delta \delta; \\ \Delta U_\Gamma = c_1 \Delta E_q + c_2 \Delta I_d + c_3 \Delta \delta + c_4 \Delta \omega + c_5 \Delta U. \end{array} \right. \quad (3)$$

Оснастим генератор автоматическим регулятором возбуждения (АРВ) сильного действия (рис. 2) [7].

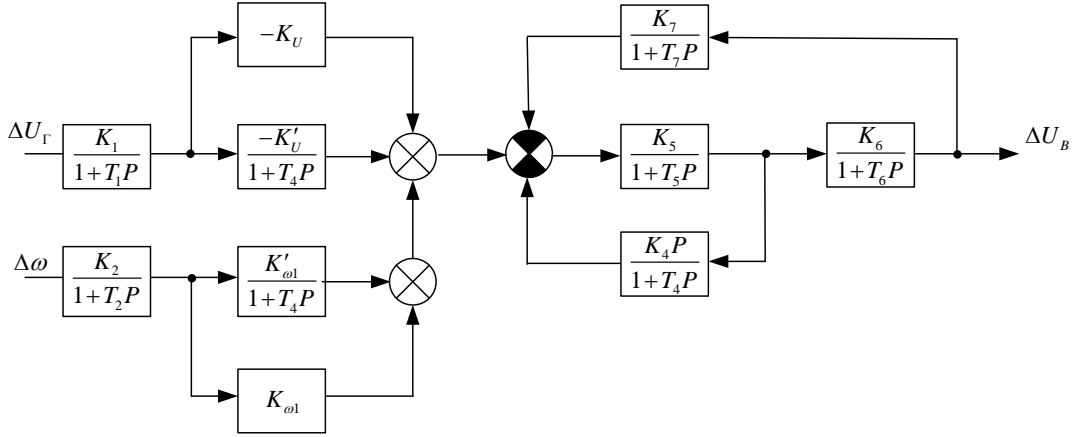


Рис. 2. Структурная схема регулятора возбуждения сильного действия

Возбуждение регулируется по отклонению напряжения, для стабилизации применяются каналы регулирования по производной этого напряжения, его частоте и по производной частоты. В структурной схеме учтены запаздывания в отдельных элементах, гибкая обратная связь используется для коррекции характеристик магнитного усилителя.

Диссипативная модель неявнополюсной синхронной машины без демпферных обмоток с АРВ, работающей на статическую нагрузку модель, адекватная системе уравнений (3), приведена в [1], а значения ее коэффициентов составляют:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \frac{\partial M}{\partial E_q} = \frac{I_{q0}}{\omega_0} = \frac{\sin \delta_0}{x_{d\Sigma 0}}; \alpha_2 = \frac{\partial M}{\partial I_q} = \frac{E_{q0}}{\omega_0} = E_{q0}; \\ \alpha_3 = \frac{\partial M}{\partial \omega} = -E_{q0} \frac{I_{q0}}{\omega_0^2} = -\alpha_1 \alpha_2; \alpha_4 = \frac{\partial E_q}{\partial \omega} = i_{B0} K_H = \frac{E_{q0}}{\omega_0} = \alpha_2; \\ \alpha_5 = \frac{\partial I_d}{\partial E_q} = \frac{1}{\omega_0 x_{d\Sigma 0}} = \frac{1}{x_{d\Sigma 0}}; \alpha_6 = \frac{\partial I_d}{\partial \omega} = -\frac{\partial E_q}{\partial \omega^2 x_{d\Sigma 0}} = -\alpha_2 \alpha_5; \\ \alpha_7 = \frac{\partial I_d}{\partial \delta} = \frac{U_0 \sin \delta_0}{\omega_{u0} x_{d\Sigma 0}} = \alpha_5 \sin \delta_0; \alpha_8 = \frac{\partial I_d}{\partial U} = -\frac{\cos \delta_0}{\omega_{u0} x_{d\Sigma 0}} = -\alpha_5 \cos \delta_0; \\ \alpha_9 = \frac{\partial I_d}{\partial \omega_u} = \frac{U_0 \cos \delta_0}{\omega_{u0}^2 x_{d\Sigma 0}} = -\alpha_8; \alpha_{10} = \frac{\partial I_q}{\partial U} = \frac{\sin \delta_0}{\omega_{u0} x_{d\Sigma 0}} = \alpha_1; \\ \alpha_{11} = \frac{\partial I_q}{\partial \delta} = \frac{U_0 \cos \delta_0}{\omega_{u0} x_{d\Sigma 0}} = \alpha_9; \alpha_{12} = \frac{\partial I_q}{\partial \omega_u} = -\frac{U_0 \sin \delta_0}{\omega_{u0}^2 x_{d\Sigma 0}} = -\alpha_1; \\ \alpha_{13} = \frac{\partial \omega_u}{\partial \delta} = \frac{R_H(x_{H0} + x_{d\Sigma 0})}{x_{H0} x_{d\Sigma 0} \cos^2 \delta_0}; \beta_1 = \frac{\partial U}{\partial E_q} = \frac{R_H \sin \delta_0}{\omega_0 x_{d\Sigma 0}} = R_H \alpha_1; \\ \beta_2 = \frac{\partial U}{\partial \delta} = \frac{E_{q0} R_H \cos \delta_0}{\omega_0 x_{d\Sigma 0}} = R_H \alpha_2 \alpha_9; \beta_3 = \frac{\partial U}{\partial \omega} = -\frac{E_{q0} R_H \sin \delta_0}{\omega_0^2 x_{d\Sigma 0}} = \beta_1 \alpha_2; \\ c_1 = \frac{A_0}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}}; c_2 = -c_1 x_{d0}; c_3 = \frac{U_0 B_0 \cos \delta_0}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} \frac{x_{d0}}{x_{d\Sigma 0}}; c_4 = -c_2 I_{d0}; c_5 = \frac{c_3}{U_0} \operatorname{tg} \delta_0, \\ \text{где } A_0 = E_{q0} - I_{d0} x_{d0}; B_0 = \frac{U_0 \sin \delta_0 x_{d0}}{x_{d\Sigma 0}}; I_{d0} = \frac{E_{q0}}{x_{d\Sigma 0}} - \frac{U_0 \cos \delta_0}{x_{d\Sigma 0}}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Несомненно, модель представляет достаточно сложную систему с большим количеством обратных связей. Следует отметить, что не все связи равнозначны по своей величине. Так, связи по скоростям $\Delta\omega$ и $\Delta\omega_u$ можно считать слабыми. Однако, их влияние на устойчивость может быть различной в зависимости от того, как проявляют действия другие связи. В случае автономной нагрузки генератора при отсутствии АРС эти слабые связи являются определяющими. Другое значение они имеют, если СМ работает на систему бесконечной мощности. В этом случае решающее значение на устойчивость нерегулируемой машины имеет связь по углу $\Delta\delta$, переходящая в связи по токам ΔI_d и ΔI_q . Связи по скоростям тоже имеют определённое значение, особенно для машин без демпферных контуров.

Гибкая положительная связь по току ΔI_d через дифференцирующее звено $W_d(P)$, отражающая влияние тока статора на ток возбуждения, представляет собой действующий в переходных режимах внутренний регулятор возбуждения машины. При увеличении продольной составляющей тока нагрузки он увеличивает возбуждение машины, оказывая существенное влияние на ее устойчивость. Следует отметить, что указанная гибкая обратная связь при определенных условиях вызывает неустойчивость, характерную для электрической части структурной схемы.

Действительно, предположим, что машина включена только на индуктивную нагрузку и вращается с постоянной скоростью. Тогда:

$$E_q = K_H i_B \omega = K_H \omega [W_B(P)U_B + W_d(P)I_d];$$

$$I_d = E_q / (x_d + x_H).$$

Решив эти уравнения относительно E_q , получаем

$$E_q = \frac{K_H \omega U_B / R_B}{T_{d0} P \frac{x'_d + x_H}{x_d + x_H} + 1}.$$

Отсюда следует, что гибкая обратная связь $W_d(P)$ вызывает самовозбуждение, если x_H принимает отрицательные значения, то есть, если генератор включен на емкостную нагрузку, величина которой лежит в пределах $x'_d < x_H < x_d$. Явление самовозбуждения можно объяснить присутствием соответствующих положительных обратных связей.

Рассмотрим диссипативную структурную модель неявнополюсной синхронной машины без демпферных обмоток, работающей на асинхронную нагрузку.

Частные производные в (7) находятся на основании выражений (5) и (6) для исходного режима с частотой сети, равной ω_0 :

$$\begin{cases} \frac{\partial P_d}{\partial U} = \frac{2P_{d0}}{U_0}; \frac{\partial P_d}{\partial \omega_u} = -\frac{P_{d0}}{U_0} \left(1 - \frac{\cos 2\varphi_{20}}{s}\right); \frac{\partial P_d}{\partial \omega_d} = -\frac{P_{d0}}{\omega_0 s_0} \cos 2\varphi_{20}; \\ \frac{\partial Q_d}{\partial U} = \frac{2Q_{d0}}{U_0}; \frac{\partial Q_d}{\partial \omega_u} = -\frac{Q_{d0}}{\omega_0} + \frac{P_{d0}}{\omega_0 s_0} \sin 2\varphi_{20}; \frac{\partial Q_d}{\partial \omega_d} = -\frac{P_{d0}}{\omega_0 s_0} \sin 2\varphi_{20}. \end{cases} \quad (8)$$

В выражениях (8):

$$\sin 2\varphi_2 = \frac{2R_d X_d s}{R_d^2 + X_d^2 s^2}; \cos 2\varphi_2 = \frac{R_d^2 - X_d^2 s^2}{R_d^2 + X_d^2 s^2}.$$

Схема замещения, применительно к которой будем строить модель, приведена на рис. 3.

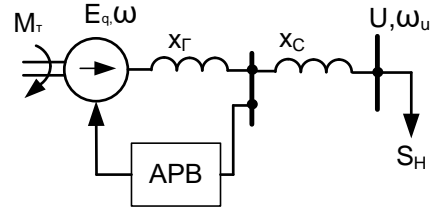


Рис. 3. Схема замещения одномашиной системы с регулируемым генератором

В качестве модели асинхронного двигателя возьмём простейшую, схема замещения которой приведена на рис. 4 [3].

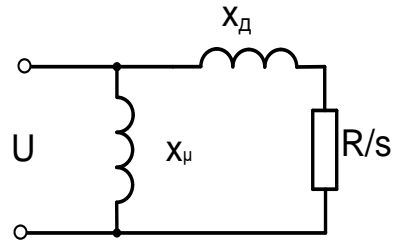


Рис. 4. Схема замещения асинхронного электродвигателя

В соответствии со схемой замещения рис. 4 активная и реактивная мощности двигателя выражаются известными зависимостями:

$$P_d = U^2 \frac{R_d s}{R_d^2 + X_d^2 s^2}; \quad (5)$$

$$Q_d = U^2 \left(\frac{1}{X_\mu} + \frac{X_d s^2}{R_d^2 + X_d^2 s^2} \right). \quad (6)$$

Здесь скольжение $s = \frac{\omega_u - \omega_d}{\omega_u}$;

индуктивность намагничивания

$$X_\mu = X_{\mu 0} \frac{\omega_u}{\omega_0}; X_d = X_{d 0} \frac{\omega_u}{\omega_0};$$

Параметры $X_{\mu 0}, X_{d 0}$ заданы для номинальной частоты ω_0 .

Переменными в уравнениях (5) и (6) являются U, ω_u, ω_d . Линеаризуя выражения для активной и реактивной мощностей, получим:

$$\begin{cases} \Delta P_d = \frac{\partial P_d}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P_d}{\partial \omega_u} \Delta \omega_u + \frac{\partial P_d}{\partial \omega_d} \Delta \omega_d; \\ \Delta Q_d = \frac{\partial Q_d}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial Q_d}{\partial \omega_u} \Delta \omega_u + \frac{\partial Q_d}{\partial \omega_d} \Delta \omega_d. \end{cases} \quad (7)$$

Для получения отклонения частоты двигателя $\Delta\omega_d$ воспользуемся уравнением движения ротора двигателя:

$$J_d P \Delta\omega_d + \Delta M_{\text{мех}} = \Delta M_d. \quad (9)$$

На основании статической моментно-скоростной характеристики вращаемого двигателем механизма:

$$\Delta M_{\text{мех}} = \frac{\partial M_{\text{мех}}}{\partial \omega_d} \Delta\omega_d. \quad (10)$$

Мощность, выделяемая в роторе двигателя:

$$P_{\text{рот}} = s P_d.$$

Поэтому, если пренебречь потерями в статоре, электромагнитный момент асинхронного двигателя можно записать в виде:

$$M_d = \frac{P_d - P_{\text{рот}}}{\omega_d} = \frac{P_d(1-s)}{\omega_d} = \frac{P_d}{\omega_u} = f(P_d, \omega_u).$$

Следовательно, в отклонениях:

$$\begin{aligned} \Delta M_d &= \frac{\partial M_d}{\partial P_d} \Delta P_d + \frac{\partial M_d}{\partial \omega_u} \Delta\omega_u = \\ &= \frac{1}{\omega_0} \Delta P_d - \frac{P_{d0}}{\omega_0^2} \Delta\omega_u. \end{aligned} \quad (11)$$

Формулы (9) – (11) совместно с первым уравнением (7) позволяют получить выражения для искомого отклонения частоты двигателя:

$$\Delta\omega_d = \frac{\frac{\partial P_d}{\partial U} \Delta U + \left(\frac{\partial P_d}{\partial \omega_u} - \frac{P_{d0}}{U_0}\right) \Delta\omega_u}{\omega_0 J_d P + \omega_0 \frac{\partial M_{\text{мех}}}{\partial \omega_d} - \frac{\partial P_d}{\partial \omega_d}}. \quad (12)$$

Преобразуем (4.26) к виду:

$$\Delta\omega_d = \frac{K_{d1}}{1 + T_d P} \Delta U + \frac{K_{d2}}{1 + T_d P} \Delta\omega_u, \quad (13)$$

$$\text{где } K_{d1} = \frac{\frac{\partial P_d}{\partial U}}{\left(\omega_0 \frac{\partial M_{\text{мех}}}{\partial \omega_d} - \frac{\partial P_d}{\partial \omega_d}\right)};$$

Частные производные в выражении (16) вычислим для установившегося режима $\omega = \omega_u = \omega_0 = 1$; $\delta = \delta_0$; $s = s_0$; $E_q = E_{q0}$:

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\partial U}{\partial E_q} = \frac{\sin \delta_0}{x_{d\Sigma 0}} A_0, \text{ где } A_0 = \frac{R_d^2 + X_{d0}^2 s_0^2}{R_d s_0}; \\ \beta_2 &= \frac{\partial U}{\partial \delta} = \frac{E_{q0} \cos \delta_0}{x_{d\Sigma 0}} A_0; \beta_3 = \frac{\partial U}{\partial \omega} = -\frac{E_{q0} \sin \delta_0}{x_{d\Sigma 0}} A_0; \\ \beta_4 &= \frac{\partial U}{\partial \omega_u} = \frac{E_{q0} \sin \delta_0}{x_{d\Sigma 0}} \cdot \frac{2X_{d0}^2 R_d s_0^2 - R_d \omega_{d0} (R_d^2 + X_{d0}^2 s_0^2)}{R_d^2 s_0^2}; \\ \beta_5 &= \frac{\partial U}{\partial \omega_d} = \frac{E_{q0} \sin \delta_0}{x_{d\Sigma 0}} \cdot \frac{-2X_{d0}^2 R_d s_0^2 - R_d \omega_{d0} (R_d^2 + X_{d0}^2 s_0^2)}{R_d^2 s_0^2}. \end{aligned} \right. \quad (17)$$

Отклонения частоты в узле подключения нагрузки выведем из баланса реактивных токов

$$I_{\Gamma} = -\frac{U}{x_{d\Sigma 0} \omega_u} + \frac{E_{q0}}{x_{d\Sigma 0} \omega} \cos \delta; I_{\text{PD}} = U \left(\frac{1}{x_{\mu 0} \omega_u} + \frac{x_{d0} (\omega_u - \omega_d)^2}{\omega_u [R_d^2 + X_{d0}^2 (\omega_u - \omega_d)^2]} \right).$$

$$K_{d2} = \left(\frac{\partial P_d}{\partial \omega_u} - \frac{P_{d0}}{U_0} \right) / \left(\omega_0 \frac{\partial M_{\text{мех}}}{\partial \omega_d} - \frac{\partial P_d}{\partial \omega_d} \right);$$

$$T_d = \omega_0 J_d / \left(\omega_0 \frac{\partial M_{\text{мех}}}{\partial \omega_d} - \frac{\partial P_d}{\partial \omega_d} \right).$$

Отклонение напряжения ΔU и частоты $\Delta\omega_u$ в узле подключения нагрузки найдем из условия баланса активной и реактивной мощности.

Внешняя активная и реактивная мощности генератора определяются известными выражениями.

Если пренебречь активным сопротивлением в цепи статора генератора:

$$\left\{ \begin{aligned} P' &= \frac{E_q U}{x_{d\Sigma(\omega)}} \sin \delta; \\ Q' &= -\frac{U^2}{x_{d\Sigma(\omega_u)}} + \frac{E_q U}{x_{d\Sigma(\omega)}} \cos \delta. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Отклонения напряжения ΔU определим через баланс активных токов:

$$I_{\Gamma} = \frac{P'}{U} = \frac{E_q}{x_{d\Sigma(\omega)}} \sin \delta;$$

$$I_{\text{AD}} = U \frac{R_d \frac{\omega_u - \omega_d}{\omega_u}}{R_d^2 + X_{d0}^2 \left(\frac{\omega_u}{\omega_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_u - \omega_d}{\omega_u}\right)^2}.$$

Откуда:

$$U = \frac{E_q \sin \delta}{x_{d\Sigma} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \cdot \frac{R_d^2 + X_{d0}^2 \left(\frac{\omega_u}{\omega_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_u - \omega_d}{\omega_u}\right)^2}{R_d \frac{\omega_u - \omega_d}{\omega_u}} = f(E_q, \delta, \omega, \omega_u, \omega_d). \quad (15)$$

Отклонение напряжения ΔU в узле подключения нагрузки:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{\partial U}{\partial E_q} \Delta E_q + \frac{\partial U}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial U}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial U}{\partial \omega_u} \Delta \omega_u + \frac{\partial U}{\partial \omega_d} \Delta \omega_d = \\ &= \beta_1 \Delta E_q + \beta_2 \Delta \delta + \beta_3 \Delta \omega + \beta_4 \Delta \omega_u + \beta_5 \Delta \omega_d. \end{aligned} \quad (16)$$

Приравнявая токи и подставляя значение U из выражения (15), получаем:

$$\omega_u = \omega_d + \frac{R_d ctg \delta}{2(FX_{d0}^2 + X_{d0})} \pm \sqrt{\left(\omega_d + \frac{R_d ctg \delta}{2(FX_{d0}^2 + X_{d0})}\right)^2 - \left(\omega_d^2 + \omega_d \frac{R_d ctg \delta}{FX_{d0}^2 + X_{d0}} + \frac{FR_d^2}{FX_{d0}^2 + X_{d0}}\right)} = f(\omega_d, \delta), \quad (18)$$

где $F = \frac{1}{x_{\mu 0}} + \frac{1}{x_{d \Sigma 0}}$.

Отклонение частоты:

$$\Delta \omega_u = \frac{\partial \omega_u}{\partial \omega_d} \Delta \omega_d + \frac{\partial \omega_u}{\partial \delta} \Delta \delta \gamma_1 \Delta \omega_d + \gamma_2 \Delta \delta, \quad (19)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_1 = \frac{\partial \omega_u}{\partial \omega_d} = 1; \\ \gamma_2 = \frac{\partial \omega_u}{\partial \delta} = -\frac{B_0}{\sin^2 \delta_0} \pm \frac{0.5 \left[2(\omega_{d0} + B_0 ctg \delta_0) \frac{-B_0}{\sin^2 \delta_0} + \frac{2B_0 \omega_{d0}}{\sin^2 \delta_0} \right]}{C}, \end{array} \right. \quad (20)$$

где $B_0 = 0,5 \frac{R_d}{FX_{d0}^2 + X_{d0}}$;

$$C = \sqrt{(\omega_{d0} + B_0 ctg \delta_0)^2 - (\omega_{d0}^2 + 2\omega_{d0} B_0 ctg \delta_0 + 2FB_0 R_d)}.$$

Напряжения на зажимах генератора найдем из векторной диаграммы неявнополюсной синхронной машины.

$$U_\Gamma = \sqrt{(E_q - I_d x_d)^2 + (U \sin \delta \frac{x_d}{x_{d \Sigma}})^2} = f(E_q, I_d, \delta, \omega, U).$$

Отклонение напряжения ΔU_Γ вычислим для установившегося режима работы:

$$\Delta U_\Gamma = \frac{\partial U_\Gamma}{\partial E_q} \Delta E_q + \frac{\partial U_\Gamma}{\partial I_d} \Delta I_d + \frac{\partial U_\Gamma}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial U_\Gamma}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial U_\Gamma}{\partial U} \Delta U = c_1 \Delta E_q + c_2 \Delta I_d + c_3 \Delta \omega + c_4 \Delta \delta + c_5 \Delta U.$$

Учитывая результаты, полученные ранее, замкнутая система уравнений, позволяющая построить структурную схему, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_J}{\omega_6} P \Delta \omega = \Delta M_\Gamma - \Delta M; \\ P \Delta \delta = \Delta \omega - \Delta \omega_u; \\ \Delta M = \alpha_1 \Delta E_q + \alpha_2 \Delta I_d + \alpha_3 \Delta \omega; \\ \Delta M_\Gamma = -\frac{K_\omega}{1 + T_\omega P}; \\ \Delta E_q = \alpha_4 \Delta \omega - \frac{K_0}{1 + T_B P} \Delta U_\Gamma + \frac{K_3 P}{1 + T_B P} \Delta I_d; \\ \Delta I_d = \alpha_5 \Delta E_q + \alpha_6 \Delta \omega + \alpha_7 \Delta U + \alpha_8 \Delta \delta + \alpha_9 \Delta \omega_u; \\ \Delta I_q = \alpha_{10} \Delta U + \alpha_{11} \Delta \delta + \alpha_{12} \Delta \omega_u; \\ \Delta U = \beta_1 \Delta E_q + \beta_2 \Delta \delta + \beta_3 \Delta \omega + \beta_4 \Delta \omega_u + \beta_5 \Delta \omega_d; \\ \Delta \omega_u = \gamma_1 \Delta \omega_d + \gamma_2 \Delta \delta; \\ \Delta \omega_d = \frac{K_{d1}}{1 + T_d P} \Delta U + \frac{K_{d2}}{1 + T_d P} \omega_u; \\ \Delta U_\Gamma = C_1 \Delta E_q + C_2 \Delta I_d + C_3 \Delta \delta + C_4 \Delta \omega + C_5 \Delta U. \end{array} \right. \quad (21)$$



Диссипативная модель неявнополюсной синхронной машины без демпферных обмоток, работающей на асинхронную нагрузку и адекватная уравнениям (21) приведена в [1].

В системе уравнений (21) коэффициенты α_i, c_i вычисляются по формулам (4), коэффициенты β_i по формулам (17), коэффициенты γ_i по формулам (20).

При работе генератора на обобщенную нагрузку, то есть когда часть нагрузки двигательная, а часть статическая, структурная модель остается без изменений, меняются лишь выражения для вычисления приращения напряжения и частоты в узле подключения нагрузки. В случае, когда статическая нагрузка является чисто индуктивной выражения для вычисления приращения напряжения в узле ΔU (18) остается без изменений, а в выражении для вычисления приращения частоты в узле подключения нагрузки (20) меняется значение коэффициента F . С учетом статической нагрузки $F = \frac{1}{x_{\mu 0}} + \frac{1}{x_{d \Sigma 0}} + \frac{1}{x_{cH0}}$, где x_{cH0} – индуктивное сопротивление статической нагрузки на частоте ω_0 .

Рассмотрим в качестве практического примера диссипативную модель генератора, снабженного АРВ сильного действия, работающего на двигательную нагрузку рис. 5.

Элементы электропередачи имеют следующие параметры:

$$G: S_{HG} = 7,5 \text{ MB} \cdot \text{A}; U_H = 6,3 \text{ кВ}; \\ x'_{d*} = 0,17; x_d = 1,65; T_J = 4,3 \text{ с};$$

Сеть: воздушная линия; $l = 10 \text{ км}$;

$$\text{АД: } P_{дH} = 5 \text{ МВт}; \cos \varphi_H = 0,86; s_H = 0,01; \\ S_{дH} = 5,8 \text{ МВ} \cdot \text{A}; U_{дH} = 6 \text{ кВ}.$$

Расчеты проведем в относительной системе единиц, приняв за базисные величины номинальные параметры двигателя.

$$x'_{d*6} = 0,145; x_{d*} = 1,4; T_{J*6} = 4,6 \text{ с}; x_{L*6} = 0,64; \\ x_{d \Sigma 0*} = 1,4 + 0,64 = 2,04.$$

Генератор работает с коэффициентом мощности нагрузки.

$$E_{q0} = \sqrt{(1 + x_{d \Sigma 0} \sin \varphi)^2 + (x_{d \Sigma 0} \cos \varphi)^2} = \\ = \sqrt{2,082^2 + 1,754^2} = 2,72. \\ \delta_0 = \arctg \frac{1,754}{2,082} = 40^\circ 30'.$$

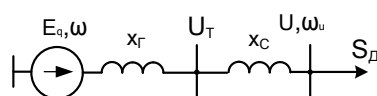


Рис. 5. Однолинейная схема и схема замещения

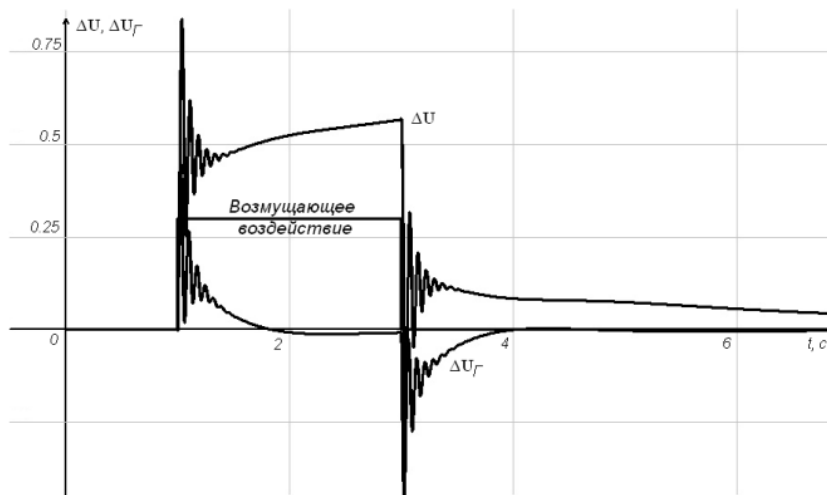


Рис. 6. Переходные процессы в одномашинной регулируемой системе с двигательной нагрузкой

Вычислим параметры схемы замещения двигателя рис. 4.

Положим $R_d = s_0 = 0,01$. Из уравнений (5) и (6) определим $X_{\mu 0}$ и $X_{\delta 0}$: $X_{\mu 0} = 2,85$; $X_{\delta 0} = 0,163$.

По уравнениям (4) вычислим коэффициенты α_i, c_i :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0.32; \alpha_2 = 2.72; \alpha_3 = -0.87; \\ \alpha_4 &= 2.72; \alpha_5 = 0.49; \\ \alpha_6 &= -1.33; \alpha_7 = 0.32; \alpha_8 = -0.37; \\ \alpha_9 &= 0.37; \alpha_{10} = 0.32; \\ \alpha_{11} &= 0.37; \alpha_{12} = -0.32; \\ c_1 &= 0.95; c_2 = -1.33; c_3 = 0.16; \\ c_4 &= -1.28; c_5 = 0.137. \end{aligned}$$

Используя уравнения (17) определим коэффициенты β_i :

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0.26; \beta_2 = 1,225; \\ \beta_3 &= -0,727; \beta_4 = -68; \beta_5 = -76. \end{aligned}$$

С учетом выражения (20) вычислим коэффициенты γ_i :

$$\gamma_1 = 1; \gamma_2 = -3.4.$$

Определим приращение частоты двигателя $\Delta\omega_d$. В соответствии с выражениями (8) вычислим частные производные в именованных единицах

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_d}{\partial U} &= 1,67 \cdot 10^3; \frac{\partial P_d}{\partial \omega_u} = \\ &= -78 \cdot 10^3; \frac{\partial P_d}{\partial \omega_d} = -1.5 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

После подстановки частных производных в выражение (12), чтобы выразить постоянную времени в секундах, умножим числитель и знаменатель на отношение $\frac{\omega_0}{P_{н0}}$. Примем моментно-скоростную характеристику вращаемого двигателем механизма $M_{МЭХ} = -0.0009 P_{н0} \omega_d$.

В результате получим:

$$\Delta\omega_d = \frac{0,021}{1+0,22P} \Delta U + \frac{0,98}{1+0,22P} \Delta\omega_u.$$

Переходные процессы в одномашинной регулируемой системе, полученные с помощью программного комплекса «Анализ систем 3.1» приведены на рис. 6 [4].

Для сравнения приведем переходные процессы в одномашинной регулируемой системе, работающей на статическую нагрузку (рис. 7).



Рис. 7. Переходные процессы в одномашинной регулируемой системе со статической нагрузкой

Мощность статической нагрузки примем равной мощности АД

$$S_{*6CH} = 0,86 + j0,51;$$

$$Z = \frac{U^2}{S_H^2} (P_H + jQ_H) = 0,86 + j0,51 = R + jX.$$

R_H и X_H в схеме равны соответственно

$$R_H = \frac{R^2 + X^2}{R} = \frac{1}{0,86} = 1,6;$$

$$X_H = \frac{R^2 + X^2}{X} = \frac{1}{0,51} = 1,96.$$

α_{13} в модели составляет:

$$\alpha_{13} = \frac{R_H X_{H0} x_{d\Sigma 0}}{(X_{H0} + x_{d\Sigma 0}) \cos^2 \delta_0} = \frac{1,6 \cdot 1,96 \cdot 2,04}{(1,096 + 2,04) \cdot 0,86^2} = 1,57.$$

Параметры регуляторов:

$$K_1=0,2; K_2=0,2; K'_U=-10;$$

$$K_{\omega 1}=10; K_4=0,03; K_5=40; K_6=0,07; K_7=0,15;$$

$$\mu \cdot \eta=0,1; K_{\omega}=2; T_1=0,03;$$

$$T_2=0,06; T_B=9,5; T_4=0,03;$$

$$T_5=0,2; T_6=0,04; T_7=0,007; T_{\omega}=2.$$

Таким образом, структурные модели позволяют выделить объект регулирования, регулятор, внутренние и внешние обратные связи, что делает наглядным исследование влияния и взаимодействия элементов системы на ее устойчивость и переходные процессы. Современное программное обеспечение позволяет визуализировать переходные процессы в автоматически регулируемых электроэнергетических системах.

Литература

1. Кушнерев, А. А. Элементы структурного анализа устойчивости энергосистем: монография / А. А. Кушнерев, А. Н. Алюнов. – [Saarbrücken]: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 86 с.
2. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергет. спец. вузов / В. А. Веников. – Москва: Высшая школа, 1985. – 536 с.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1974. – 839 с.
4. Евстигнеев, Д. В. Инструкция пользователя программного комплекса «Анализ систем 3.1» / Д. В. Евстигнеев, О. А. Тягунов. – Москва: МИРЭА, 1999. – 20 с.
5. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. – Москва: Энергия, 1979. – 456 с.
6. Костюк, О. М. Элементы теории устойчивости энергосистем / О. М. Костюк. – Киев: Наукова думка, 1983. – 295 с.
7. Щербачев, О. В. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике: учеб. пособие для вузов / О. В. Щербачев, А. Н. Зейлигер, К. П. Кадомская. – Ленинград: Энергия, 1980. – 236 с.
8. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: учебник для студентов вузов / под ред. В. А. Веникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1981. – 288 с.

A.A. Kushnerev, A.N. Alyunov
Vologda State University

STRUCTURAL MODELING AND ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS STATIC STABILITY

The issues of modeling and analyzing of electric power systems static stability based on the equations of quasistationary modes of synchronous machines based on the Park – Gorev equations are considered. A block diagram of the dissipative model of an implicit-pole synchronous machine without damping windings with an automatic excitation regulator operating on a static load has been developed. A dissipative model of an implicit-pole synchronous machine without damping windings, operating on asynchronous load, is proposed. A practical example of a dissipative generator model equipped with a high-action automatic excitation regulator operating on a motor load is considered. Waveforms of transient processes are obtained using the software.

Structural modeling, static stability, electric power systems.