

УДК 629.12.066

Л.Н. Канов, доц., канд. техн. наук,

А.С. Гуревич, аспирант

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: Root@sevgtu.sebastopol.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СУДОВЫХ АВТОНОМНЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРАХ МЕТОДОМ СХЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Построена схемная модель электромеханической системы «синхронный генератор – асинхронный двигатель» с учетом насыщения магнитных цепей машин. Исследован переходный процесс прямого пуска асинхронного двигателя от синхронного генератора соизмеримой мощности.

В динамических переходных режимах судовой электростанции при включении достаточно мощных электроприводов имеет место снижение (провал) напряжения. Величина и длительность провала обусловлены процессами в синхронном генераторе при внезапном изменении тока статора и зависят как от параметров генераторного агрегата, так и от системы автоматизированного управления его режимом. Этот переходный процесс осложняется тем, что под действием возросшей нагрузки падает также и скорость вращения генератора.

Определение длительности и величины изменения напряжения в этих условиях является одной из главных задач при проектировании судовой электростанции, в которой предполагается пуск асинхронных, короткозамкнутых двигателей большой мощности. Известные методы расчета провала напряжения [1, 2] ограничиваются случаем пуска электродвигателя мощности не выше 20...25 % мощности генератора. Кроме того, изменение скорости генератора обычно не учитывается. Подобные методы расчета, примененные для анализа пуска двигателя большой мощности, приводят к значительным погрешностям.

Практика проектирования судовых электростанций показывает, что необходимо рассчитывать изменение напряжения генератора при любом способе пуска двигателя любой мощности с учетом изменения скорости вращения приводного дизеля, т.к. это оказывает значительное влияние на величину и длительность провала напряжения. Кроме того, изменение частоты генератора представляет самостоятельный интерес при определении условий устойчивой работы ранее включенных двигателей и иной аппаратуры. Расчет переходного режима генераторного агрегата в целом позволяет решить вопрос о возможности пуска двигателя большой мощности по условию перегрузки приводного дизеля.

Необходимость анализа сложных электромеханических и электрических процессов электротехнической системы приводной дизель – синхронный гене-

ратор – асинхронный двигатель заставляет отказаться от получения явных выражений для напряжений, токов и скорости вращения генератора и прибегнуть к моделированию описанного переходного процесса. Особенностью задачи является то обстоятельство, что ввиду отмеченных выше сложностей непосредственное математическое моделирование подобных систем также затруднено ввиду наличия большого количества нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих рассматриваемую систему.

Целью статьи является разработка методики схемного моделирования для анализа переходных процессов в сложных электромеханических системах и получения результатов, с удовлетворительной степенью точности соответствующим опытным данным.

Метод схемного моделирования предполагает построение схемных моделей основных элементов электротехнической системы и сопряжение их между собой. Схемные модели представляют собой сложные нелинейные цепи постоянного тока, состоящие из сопротивлений, проводимостей, емкостей, индуктивностей, управляемых и независимых источников тока и напряжения, и могут автоматически рассчитываться существующим программным обеспечением. Электрические процессы в схемных моделях точно соответствуют электрическим и электромеханическим переходным процессам в исследуемых электротехнических системах. Схемные модели синхронного генератора и асинхронного двигателя получены на основании уравнений Парка - Горева во вращающихся координатах, связанных с ротором генератора [4]. Рассмотрим моделирование приводного дизеля вместе с системой стабилизации скорости вращения, а также систему стабилизации напряжения генератора.

Приведем упрощенное уравнение регулятора скорости вращения [2]. Уравнение движения муфты измерителя и поршня сервомотора имеет вид

$$\delta_r \xi_c + \varphi = \frac{F}{2E_r} + k_\lambda \delta_r \lambda, \quad (1)$$

где δ_r – коэффициент, характеризующий степень неравномерности измерителя; $\xi_c = \frac{x}{x_{\text{ном}}} - 1$ – относительное отклонение поршня сервомотора от

установившегося положения; $\varphi = \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} - 1$ – относительное отклонение

скорости вращения вала двигателя; F – сила, с которой элементы системы действуют на измеритель; E_r – средняя поддерживающая сила измерителя; k_λ – коэффициент пропорциональности между нагрузкой и импульсом, действующим на систему; $\lambda = \frac{P}{P_{\text{ном}}} - 1$ – относительное отклонение нагруз-

ки на двигатель. Далее запишем уравнение силовой обратной связи при движении золотника вместе с измерителем, когда на измеритель действует

сила, обусловленная смещением верхнего конца пружины муфты измерителя и пропорциональная перемещению поршня сервомотора:

$$\frac{F}{2E_r} = -T_k \frac{d\sigma}{dt} - \delta_s \sigma - \delta_r \sigma. \quad (2)$$

Здесь T_k – постоянная, характеризующая трение; δ_s – постоянная, характеризующая силу, стремящуюся вернуть золотник в среднее положение;

$\sigma = \frac{s}{s_{\text{ном}}} - 1$ – относительное отклонение координаты золотника; τ – относительное время. Уравнение сервомотора имеет вид, характерный для интегрирующего звена

$$T_c \frac{d\xi_c}{dt} = \sigma, \quad (3)$$

где T_c – постоянная времени поршня сервомотора. К этим уравнениям добавим уравнение для отклонения скорости вращения двигателя от номинальной

$$T_a \frac{d\varphi}{dt} + \beta_c \varphi = v \xi_c - \lambda, \quad (4)$$

где $T_a = \frac{J_0}{M_{\text{ном}}}$ – постоянная времени для вращающихся масс агрегата; J –

момент инерции вращающихся масс; $\beta_c = \left[\left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_{\text{дв}}}{\partial \omega} \right)_0 \right] \frac{\omega_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}}$ –

коэффициент саморегулирования дизеля; $v = \left(\frac{\partial M_{\text{дв}}}{\partial x} \right)_0 \frac{x_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}}$ – коэффициент

пропорциональности между вращающим моментом и отклонением регулирующего органа, $v \approx 1$.

Подставив уравнение силовой обратной связи (2) и выражение для σ из уравнения сервомотора (3) в (1), сокращая на δ_r и полагая в соответствии с общепринятыми допущениями $k_\lambda = 1$, получаем уравнение стабилизатора скорости:

$$\frac{T_k T_c}{\delta_r} \frac{d^2 \xi_c}{dt^2} + \left(1 + \frac{\delta_s}{\delta_r} \right) T_c \frac{d\xi_c}{dt} + \xi_c = \lambda - \frac{\varphi}{\delta_r}. \quad (5)$$

Схемная модель, соответствующая уравнениям дизеля (4) и регулятора (5), изображена на рисунке 1, где обозначены линейные емкости:

$C1 = T_a$, $C2 = \frac{T_k}{\delta_r}$; линейные проводимости: $g1 = \beta_c$, $g2 = 1 + \frac{\delta_s}{\delta_r}$; индук-

тивность $L1 = T_c$; линейные управляемые источники: $J1 = 1 \cdot \xi_c$, $J3 = \frac{1}{\delta_r} \varphi$;

независимый источник тока $J2 = \lambda$. Напряжение на емкости $C1$ численно равно отклонению скорости φ , ток в индуктивности $L1$ – отклонению поршня сервомотора. Как следует из рисунка 1, в статическом режиме $\xi_c = \lambda - \frac{1}{\delta_r} \varphi$ и $\varphi = 0$. Таким образом, построенная схемная модель стаби-

лизатора скорости обеспечивает полную инвариантность скорости вращения дизеля от нагрузки: отклонение скорости $\varphi = 0$ при любом отклонении нагрузки λ в стационарном режиме.

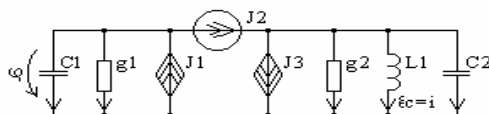


Рисунок 1 – Схемная модель регулятора скорости дизеля

Упрощенные уравнения электромашиной системы возбуждения и стабилизации напряжения генератора с учетом насыщения магнитной цепи возбудителя имеют вид

$$L_B \frac{di_{BB}}{dt} + r_B i_{BB} = a_B \cdot \arctg \left[b_B \cdot \left(1 - \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \right) \right], u_f = u_{fxx} + k_B i_{BB} \omega_z, \quad (6)$$

где i_{BB} – ток возбуждения возбудителя; L_B, r_B – индуктивность и сопротивление обмотки возбуждения возбудителя; a_B, b_B – коэффициенты аппроксимации характеристики возбудителя, под знаком обратной тригонометрической функции – разность между номинальным и фактическим действующим значением напряжения на выводах генератора; u_{fxx} – напряжение на выходе возбудителя, обеспечивающее напряжение холостого хода генератора; k_B – коэффициент пропорциональности; $\omega_z = 1 + \varphi$ – скорость вращения ротора генератора; u_f – напряжение обмотки возбуждения генератора.

Полная схемная модель системы «синхронный генератор – асинхронный двигатель» с учетом насыщения генератора по продольной оси и асинхронного двигателя изображена на рисунке 2. Переходный процесс возникает при прямом подключении неподвижного двигателя к генератору в режиме холостого хода, так что продольные составляющие напряжения генератора и двигателя совпадают, то же относится и к поперечным составляющим напряжения, а также к составляющим тока статоров машин.

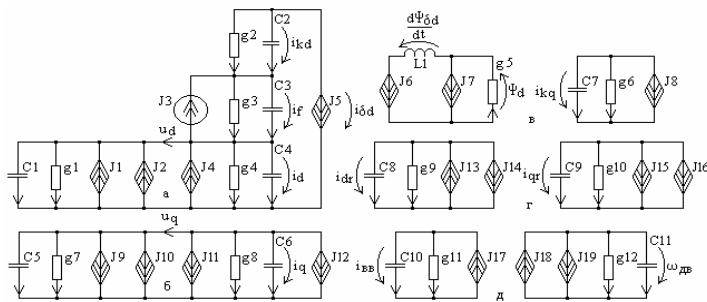


Рисунок 2 – Схемная модель системы СГ – АД

В статорной цепи по продольной и поперечной осям на рисунках 2 а, б обозначены линейные проводимости: $g1 = g7 = r_s$ – сопротивление статора двигателя, $g2 = r_{kd}$ – сопротивление продольного демпферного контура, $g3 = r_f$ – сопротивление обмотки возбуждения генератора, $g4 = g8 = r$ – сопротивление статора генератора; линейные емкости: $C1 = C5 = x_{\sigma s}$ – сопротивление рассеивания статора двигателя, $C2 = x_{kd}$ – сопротивление рассеивания продольного демпферного контура генератора, $C3 = x_{\sigma f}$ – сопротивление рассеивания обмотки возбуждения генератора, $C4 = x_{\sigma d}$ – сопротивление рассеивания по продольной оси обмотки статора генератора, $C6 = x_q$ – сопротивление по поперечной оси обмотки статора генератора.

Далее обозначен независимый источник тока $J3 = u_f = u_{fxx} + k_B \omega_z i_{BV}$

по выражению (6); линейные управляемые источники тока: $J5 = 1 \cdot \frac{d\psi_{\delta d}}{dt}$,

где $\psi_{\delta d}$ – потокосцепление в зазоре по продольной оси генератора,

$J12 = x_{aq} \frac{di_{kq}}{dt}$; нелинейные управляемые источники тока: $J1 = x_{\sigma s} \omega_z i_{qs}$.

$J2 = x_m(i_{\delta}) \left[\omega_z (i_{qs} + i_{qr}) - \frac{d}{dt} (i_{dr} + i_{ds}) \right]$, где $x_m(i_{\delta}) = \frac{a_s \cdot \arctg(b_s i_{\delta})}{i_{\delta}} + c_s$,

$i_{\delta} = \sqrt{(i_{ds} + i_{dr})^2 + (i_{qs} + i_{qr})^2}$ – намагничивающий ток двигателя, a_s, b_s, c_s –

коэффициенты аппроксимации характеристики намагничивания двигателя, $J4 = \omega_z \psi_q$, где $\psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{kq}$ – потокосцепление по поперечной оси

генератора, $J9 = x_{\sigma} \omega_z i_{ds}$, $J10 = x_m(i_{\delta}) \left[\omega_z (i_{ds} + i_{dr}) + \frac{d}{dt} (i_{qr} + i_{qs}) \right]$,

$J11 = \omega_{\psi d}$. Напряжения на проводимостях $g1, g7$ численно равны, соответственно, $i_{ds} = i_d$, $i_{qs} = i_q$; на проводимостях $g2, g3$ — i_{kd}, i_f , на источнике тока $J5$ — $i_{\delta d}$ — намагничивающий ток генератора по продольной оси. Токи в проводниках между $J2, J4$ и между $J10, J11$ численно равны составляющим напряжения на статорах машин.

На рисунке 2, в изображены контуры формирования потокосцепления Ψ_d и тока поперечной демпферной обмотки генератора. Здесь же обозначены линейные проводимости: $g5 = 1$, $g6 = r_{kq}$; индуктивность $L1 = 1$, необходимая для получения напряжения, равного производной от Ψ_d ; емкость $C7 = x_{kq}$; линейные управляемые источники тока $J7 = x_{\sigma d} i_d$, $J8 = x_{ad} \frac{di_q}{dt}$; нелинейный управляемый источник тока $J6 = \Psi_{\delta d} = a \cdot \arctg(bi_{\delta d}) + ci_{\delta d}$ — продольная составляющая потокосцепления в зазоре, зависящая от продольного намагничивающего тока $i_{\delta d} = i_d + i_f + i_{kd}$. Напряжение на единичной проводимости $g5$ численно равно продольной составляющей потокосцепления, на единичной индуктивности $L1$ — производной $\frac{d\Psi_d}{dt}$, на емкости $C7$ — поперечной составляющей тока в демпферном контуре.

На рисунке 2, г изображены контуры роторной цепи двигателя. На этом рисунке обозначены линейные проводимости $g9 = g10 = r_r$; емкости $C8 = C9 = x_{\sigma r}$; нелинейные управляемые источники тока:

$$J13 = x_{\sigma r} \cdot (\omega_{\psi} - \omega_{\partial\delta}) i_{qr}, \quad J14 = x_m(i_{\delta}) \cdot \left[\frac{d}{dt}(i_{dr} + i_{ds}) - (\omega_{\psi} - \omega_{\partial\delta})(i_{qr} + i_{qs}) \right],$$

$$J15 = x_{\sigma r} \cdot (\omega_{\psi} - \omega_{\partial\delta}) i_{dr}, \quad J16 = x_m(i_{\delta}) \cdot \left[\frac{d}{dt}(i_{qr} + i_{qs}) + (\omega_{\psi} - \omega_{\partial\delta})(i_{dr} + i_{ds}) \right].$$

Напряжения на проводимостях $g9, g10$ численно равны продольной и поперечной составляющим тока ротора.

В соответствии с первым уравнением из (6) на рисунке 2, д изображен контур тока возбуждения возбудителя, где обозначена проводимость $g11 = r_B$, емкость $C10 = L_B$, нелинейный управляемый источник тока $J17 = a_B \cdot \arctg \left[b_B \left(1 - \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \right) \right]$. Напряжение на проводимости $g11$ численно равно току возбуждения возбудителя.

Контур формирования скорости двигателя изображен на рисунке 2, д, где обозначена проводимость $g12 = k_{TP}$, имитирующая коэффициент на-

грузки, пропорциональной скорости; емкость $C11 = J$ – приведенный момент инерции ротора; нелинейные управляемые источники тока: $J18 = x_m(i_\delta)i_{dr}i_{qs}$, $J19 = x_m(i_\delta)i_{ds}i_{qr}$ – ток этих двух источников имитирует вращающий момент двигателя. Напряжение на емкости $C11$ численно равно скорости вращения двигателя.

К построенной таким образом схемной модели следует присоединить схемную модель регулятора скорости вращения приводного двигателя (рисунки 1), где источник тока $J2 = \lambda$ теперь определяется относительным отклонением электромагнитного момента генератора $J2 = \psi_q i_d - \psi_d i_q - 1$.

В качестве примера рассмотрим моделирование переходного процесса прямого пуска асинхронного двигателя мощностью 50 кВт, который имеет следующие параметры: напряжение 220 В, ток 81,3 А, активные сопротивления статора и ротора 0,09 Ом и 0,045 Ом, реактивные сопротивления рассеивания статора и ротора 0,249 Ом и 0,386 Ом, сопротивление взаимной индукции 10,1 Ом, индуктивность статора 0,033 Гн. Этот двигатель подключается к генератору мощностью 100 кВт с параметрами: номинальное напряжение и ток 235 В и 314 А, ток возбуждения 38 А, сопротивление рассеивания $x_s = 0,05$ о.е., сопротивления статора $x_d = 1,25$ о.е., $x_q = 0,7$ о.е., активное сопротивление фазы статора $r = 0,02$ Ом.

Приведем параметры двигателя к относительным единицам, используя в качестве базисных – параметры режима генератора и предположим, что генератор до подключения двигателя находился в режиме холостого хода, а двигатель не вращался. В соответствии с этим начальные напряжения на емкостях $C1, C2, C4 - C9, C11$ на рисунке 2 и на емкостях $C1, C2$ на рисунке 1 принимаются нулевыми, начальный ток на индуктивности $L1$ (рисунок 1): $i_{L1}(0) = -1$.

На рисунке 3 изображен переходный процесс включения двигателя, рассчитанный на основе построенной схемной модели. Сопоставление этого рисунка с опытной осциллограммой (см, например, [1]) показывает, что в общих чертах имеется соответствие опытных и расчетных результатов. В первый момент после включения двигателя напряжение на генераторе снижается на 22 %, поэтому ток возбуждения возбудителя и напряжение обмотки возбуждения генератора увеличивается и через 0,5 с достигает 2,8 – кратного значения по сравнению с уровнем холостого хода. За все время пуска ток возбуждения поддерживается на уровне 1,25 о.е., а в статорах машин возникает пусковой ток, втрое превышающий ток стационарного рабочего режима двигателя. К концу первой секунды двигатель разгоняется до скорости 0,92 о.е., а скорость генератора уменьшается на 8 % и затем через 0,5 с под действием стабилизатора восстанавливается до номинального значения.

Действие регулятора скорости иллюстрируется кривой 1, показывающей перемещение рейки топливного насоса. С момента включения рейка начинает перемещаться и к концу первой секунды обеспечивает максимум подачи топлива, а затем подача топлива незначительно снижается до нового уровня, соответствующего рабочему режиму дизеля под нагрузкой. Напряжение генератора восстанавливает свое номинальное значение только к концу первой секунды, однако и осциллограммы, и расчетные графики показывают наличие выброса напряжения до 6 % от номинального, который к концу второй секунды затухает.

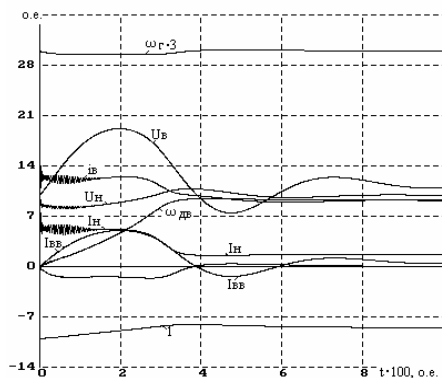


Рисунок 3 – Переходный процесс пуска двигателя (скорость генератора показана увеличенной втрое)

Отметим, что на осциллограмме колебания тока возбуждения и напряжения возбуждения генератора имеют заостренный вид, в то время как расчетные графики этих величин более плавные, что объясняется упрощенным моделированием возбудителя. В течение 0,3 с после включения в цепи тока статоров и возбуждения генератора возникают характерные высокочастотные колебания, которые

наблюдаются и на осциллограмме и на расчетных графиках, что также отмечается и другими исследователями [3].

Таким образом, построенная схемная модель электромеханической системы «синхронный генератор – асинхронный двигатель» позволяет анализировать переходные процессы с учетом насыщения магнитных цепей машин, а также с учетом вытеснения тока в пазу статора двигателя. Модель дает возможность имитировать процессы наброса и сброса нагрузки на двигатель, а также аварийные процессы потери возбуждения генератора или короткого замыкания.

Весьма перспективным развитием этого направления является дальнейшее уточнение моделей машин, а также моделирование более сложных систем, содержащих наряду с динамической и статической нагрузкой.

Библиографический список

1. Качество электрической энергии на судах / В.В. Шейнихович, О.М. Климанов, Ю.И. Пайкин. — Л.: Судостроение, 1988. — 160 с.
2. Яковлев Г.С. Судовые электроэнергетические системы / Г.С. Яковлев. — Л.: Судостроение, 1987. — 272 с.

3. Воскобаев В.С. Электроэнергетические установки и силовая электроника транспортных средств / В.С. Воскобаев. — СПб.: Изд-во «Элмор», 2001. — 384 с.
4. Канов Л.Н. Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока/ Л.Н. Канов// Электротехника та електроенергетика. — 2004. — №1. — С.5–9.

Поступила в редакцию 04.10.2005 г.