

Королев В. И., студент 2 курс магистратуры, кафедра «Электромеханика, электрические и электронные аппараты»

Национальный Исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА НАГРУЗКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

Аннотация: Синхронные машины в настоящее время получают все более широкое применение в различных областях техники в связи с широким прогрессом в области электроники. Синхронные генераторы вырабатывают порядка 80% всей электроэнергии во всем мире. Аварийные режимы работы синхронных генераторов на тепловых электростанциях, гидроэлектростанциях или в составе автономных электроустановок могут привести к перебоям в подаче электроэнергии конечному потребителю и дорогостоящему ремонту оборудования.

Повышение надежности работы синхронного двигателя тесно связано с управлением возбуждением в аварийных и предаварийных режимах.

Данная работа посвящена актуальной теме – рассмотрению различных датчиков, определяющих угол нагрузки синхронных машин, их использование для предотвращения выхода машины из синхронизма.

Ключевые слова: Синхронная машина, аварийный режим, выпадение из синхронизма, датчик угла нагрузки, стабилизация.

Annotation: Synchronous machines are currently being increasingly used in various fields of technology. Synchronous generators produce about 80% of all electricity worldwide. Emergency modes of operation of synchronous generators in thermal power plants, hydroelectric power plants or as part of stand-alone electrical

installations can lead to interruptions in the supply of electricity to the end user and costly equipment repairs.

Improving the reliability of the synchronous motor associated with the control of the excitation in emergency and pre-emergency modes.

This work is devoted to the topic: consideration of various sensors, synchronization of machines.

Key words: Synchronous machine, operating emergency conditions, drop-out of synchronism, load angle sensor, stabilization.

Синхронные машины в настоящее время получают все более широкое применение в различных областях техники в связи с широким прогрессом в области электроники.

Аварийные режимы работы синхронных генераторов на тепловых электростанциях, гидроэлектростанциях или в составе автономных электроустановок могут привести к перебоям в подаче электроэнергии конечному потребителю и дорогостоящему ремонту оборудования.

Повышение надежности работы синхронного двигателя тесно связано с управлением возбуждением в аварийных и предаварийных режимах.

Данная работа посвящена актуальной теме – рассмотрению различных датчиков, определяющих угол нагрузки синхронных машин, их использование для предотвращения выхода машины из синхронизма и их моделирование.

Датчик угла нагрузки синхронных машин должен вычислять значение угла нагрузки по легко измеряемым показателям синхронной машины, таким как: ток возбуждения I_f , напряжение возбуждения U_f , активный и реактивный токи статора.

Исходя из того, что начальное значение потокосцепления обмотки возбуждения $\Psi_f(0)$ известно из уравнений, соответствующих установившемуся режиму работы синхронной машины, то потокосцепление Ψ_f в переходном режиме определяется по напряжению возбуждения U_f и току возбуждения I_f согласно уравнению (1)[1, с. 95]:

$$\psi_f = \int_0^t (u_f - i_f r_f) d\tau + \psi_f(0) \quad (1)$$

Потокосцепление обмотки возбуждения Ψ_f и потокосцепление статора Ψ_{sd} по продольной оси связаны с токами в контурах машины следующими уравнениями:

$$\psi_{sd} = i_{sd}L_d + i_f L_{ad} + i_{sq}L_{aq} \quad (2)$$

$$\psi_f = i_{sd}L_{ad} + i_f L_f + i_{sq}L_{aq} \quad (3)$$

Продольный ток статора i_{sd} , входящий в уравнения (2) и (3), может быть определен лишь при известных значениях угла нагрузки δ , активного и реактивного тока статора. Если ток i_{sx} соответствует реактивному току статора и ориентирован вдоль вектора потокосцепления статора $\Psi_s = (\Psi_{sd} + j\Psi_{sq})$, а ток i_{sy} соответствует активному току статора и совпадает с вектором напряжения статора $U_s = (U_{sd} + jU_{sq})$, то угол нагрузки δ является углом сдвига между координатными осями dq и xy:

$$i_s^{xy} = i_{sx} + j i_{sy} = (i_{sd} + j i_{sq}) \cdot e^{-j\delta} \quad (4)$$

$$i_{sx} = Re \cdot i_s^{xy} = Re \cdot i_s^{dq} \cdot e^{-j\delta} = i_{sd} \cos(\delta) + i_{sq} \sin(\delta) \quad (5)$$

$$i_{sy} = Im \cdot i_s^{xy} = Im \cdot i_s^{dq} \cdot e^{-j\delta} = i_{sq} \cos(\delta) + i_{sd} \sin(\delta) \quad (6)$$

Из выражений (4)-(6) можно получить продольный ток статора:

$$i_{sd} = i_{sx} \cos(\delta) - i_{sy} \sin(\delta) \quad (7)$$

Величина потокосцепления Ψ_{sd} из уравнения (2) зависит от напряжения статора U_s и угла нагрузки δ , поскольку проекция вектора потокосцепления статора на ось d определяется следующим выражением:

$$\psi_{sd} = \psi_s \cos(\delta) = \omega_s^{-1} u_s \cos(\delta) \quad (8)$$

В результате объединения выражений (1)-(3) и (7)-(8), получаем, что потокосцепление обмотки возбуждения выражается уравнением:

$$\psi_f = \omega_s^{-1} u_s \cos(\delta) - L_\sigma (i_{sx} \cos(\delta) - i_{sy} \sin(\delta)) + i_f L_{\sigma f} \quad (9)$$

Уравнение (9) можно преобразовать к виду:

$$(\omega_s^{-1} u_s - i_{sx} L_\sigma) \cos(\delta) + (i_{sy} L_\sigma) \sin(\delta) - (\psi_f - i_f L_{\sigma f}) = 0 \quad (10)$$

Уравнение (10) имеет несколько решений для угла δ :

$$\delta = \pm \arccos \frac{\psi_f - i_f L_{\sigma f}}{\sqrt{(w_s^{-1} u_s - i_{sx} L_{\sigma})^2 + (i_{xy} L_{\sigma})^2}} + 2\pi n + \theta$$

$$\theta = \arctg \left(\frac{i_{xy} L_{\sigma}}{w_s^{-1} u_s - i_{sx} L_{\sigma}} \right) + \pi n$$
(11)

Где, исходя из физических соображений, верным корнем является:

$$\delta = -\arccos \frac{\psi_f - i_f L_{\sigma f}}{\sqrt{(w_s^{-1} u_s - i_{sx} L_{\sigma})^2 + (i_{xy} L_{\sigma})^2}} + \xi$$

Где $\xi = \arctg \left(\frac{i_{xy} L_{\sigma}}{w_s^{-1} u_s - i_{sx} L_{\sigma}} \right)$

(12)

Для вычисления угла нагрузки по формуле (12) напряжение статора U_s и ток возбуждения i_f измеряются непосредственно, а потокосцепление Ψ_f вычисляется по формуле (1). Активный i_{sy} и реактивный i_{sx} токи статора вычисляются через фазные токи и напряжения статора в физических координатах [2, с. 204].

По формулам (1), (9), (12) была составлена структурная схема синхронной машины с датчиком угла нагрузки, состоящая из синхронной машины (СМ), приводного двигателя (ПД), датчика напряжения статора (ДНС), датчика тока статора (ДТС), датчика тока возбуждения (ДТВ), преобразователя активно-реактивной мощности (ПАРМ), представленная на рисунке 1:

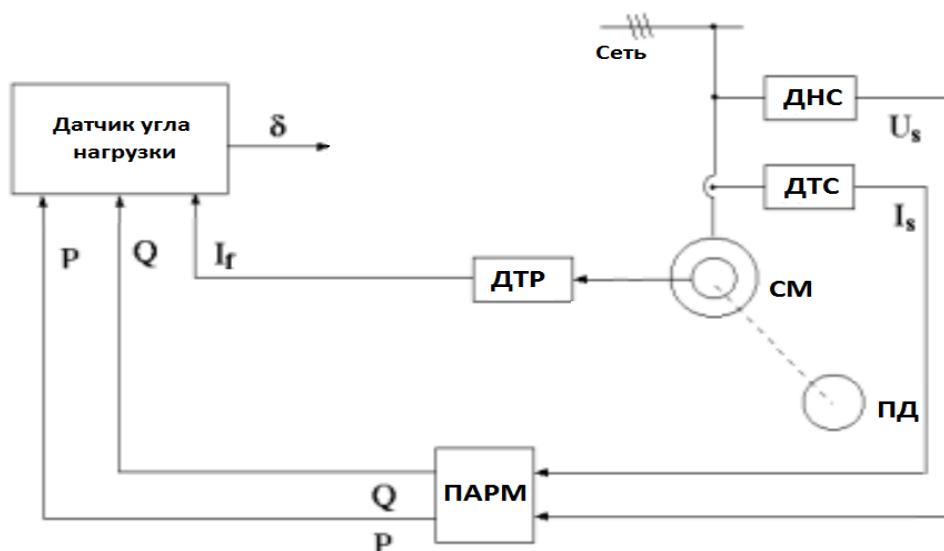


Рисунок 1. Структурная схема работы датчика угла нагрузки синхронной машины.

По данной структурной схеме в среде MATLAB Simulink была составлена блок схема, представленная на рисунке 2:

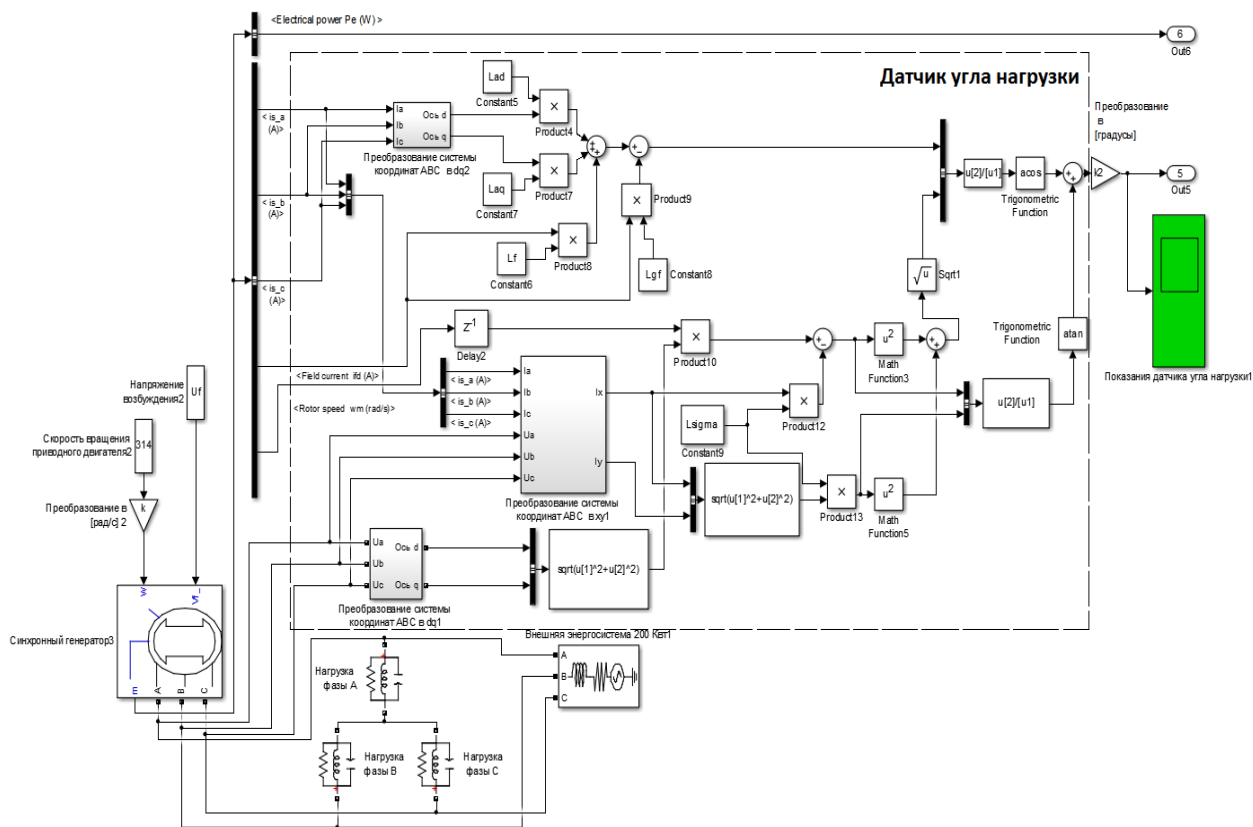


Рисунок 2. Блок схема датчика синхронного генератора, подключенного к внешней энергосистеме с датчиком угла нагрузки.

В составленной блок схеме используется преобразование исходной системы неподвижных фазных осей, совпадающих с осями «А», «В», «С» обмоток статора, к двум взаимно-перпендикулярным осям «d» и «q», жестко связанных с вращающимся ротором и направленным по продольному и поперечному направлениям магнитопровода ротора, соответственно. Также используется блок преобразования системы координат «dq» к системе координат ху. Для этого систему координат «А» «В» «С» преобразуется в неподвижную систему координат «αβ», которая в дальнейшем преобразуется во вращающуюся «ху».

Для получения угловой характеристики синхронного генератора необходимо произвести серию опытов, при разной внешней нагрузке. При проведении опытов использовалась модель явнополюсного синхронного генератора ГАБ-2-Т/230-М1.

После обработки результатов серии опытов можно построить график зависимости активной мощности синхронного генератора от показаний датчика угла нагрузки.

Данная зависимость представлена на рисунке 3:

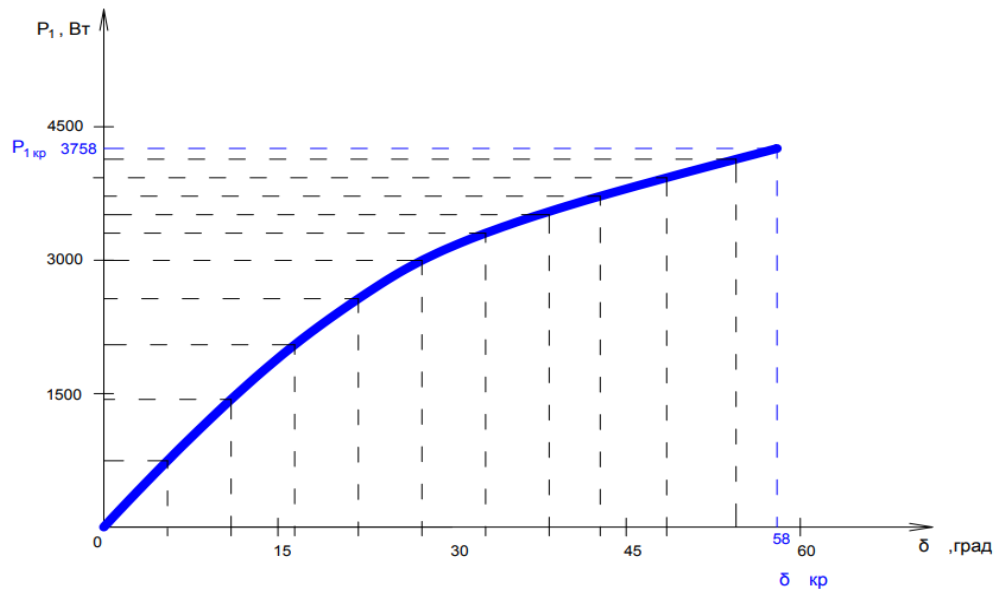


Рисунок 3. Зависимость выходной мощности генератора от угла нагрузки.

Характеристику моделируемого синхронного генератора возможно получить только в области устойчивой работы, без выпадения из синхронизма ($\delta < \delta_{крит}$).

Как видно из формул (1), (9), (12), из-за применения преобразования системы координат вращающейся синхронно с потокосцеплением ротора и ориентируемую по его направлению (d-q), в систему вращающуюся синхронно с ротором и ориентированную по оси фазы А его обмотки (x-y), для использования подобных датчиков угла нагрузки на практике, необходимо знать мгновенные значения напряжений и токов каждой фазы статора и мгновенные значения тока и напряжения цепи возбуждения. Для того, чтобы проанализировать работоспособность и возможность применения данного датчика угла нагрузки необходимо построить теоретические угловые характеристики.

Активная мощность синхронной машины определяется выражением:

$$P_1 = m_1 U_1 \cos(\varphi_1) \quad (13)$$

Используя векторную диаграмму, рисунок 4, можно преобразовать формулу (13) к зависимости $P_1 = f(\delta)$ [3, с. 253].

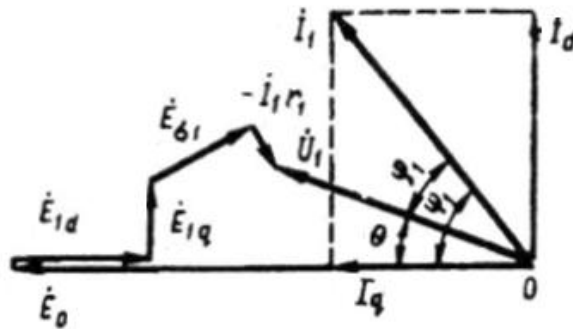


Рисунок 4. векторная диаграмма синхронного генератора.

$$P_1 = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \sin(\delta) + \frac{m_1 U_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (14)$$

Ниже, на рисунке 5, приведены сравнительные угловые характеристики, рассчитанные теоретически и полученные опытным путем.

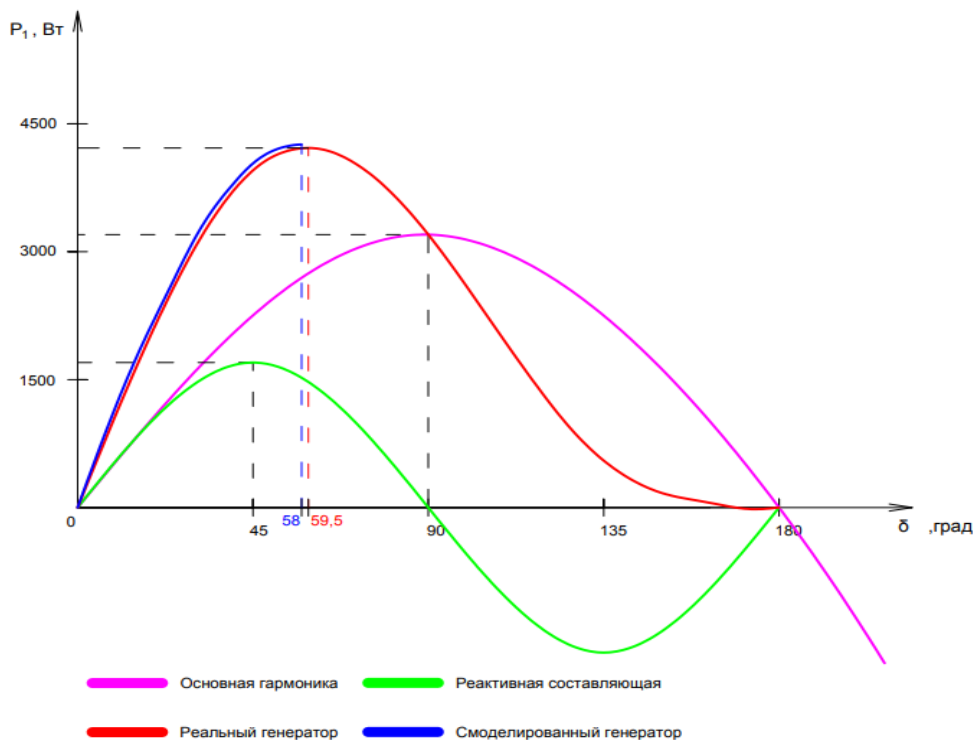


Рисунок 5. Угловые характеристики синхронного генератора.

Представленные графики свидетельствуют о высокой точности косвенного измерения угла нагрузки по токам и напряжениям в статорных

контурах синхронного генератора и в его обмотке возбуждения. Учитывая тот факт, что для применения подобных методов не требуется дорогостоящих датчиков и какого-либо вмешательства во внутреннюю конструкцию машины, можно сделать вывод о целесообразности применения датчиков с косвенным определением угла нагрузки при эксплуатации синхронных машин.

Библиографический список:

1. А. И. Важнов, Переходные процессы в машинах переменного тока – Л.: Энергия, 1980.
2. С. Е. Степанов, Вычислитель угла нагрузки для синхронных двигателей. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева No 3 (82), С. 204-210.
3. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский, Электрические машины. Ч. 2. – М.: Энергия, 1965. – 704 с.