

# Моделирование самораскачивания синхронного генератора.

**Бекишев Аллаберген Ергашевич** - старший преподаватель Ташкентский государственный технический университет им. И.А. Каримова  
**Курбанов Нажмиддин Абдухамидович** – старший преподаватель Каршинского инженерно-экономического института.

**Аннотация:** Нисбий бирликлар тизимида Парк-Горев тенгламалари асосида синхрон генераторнинг математик модели берилган. Ушбу метод ёрдамида, электр машиналарини лойihalаш ва тайёрлашда ишлатиладиган магнит материаллар хусусияти тўғрисида етарли маълумотлар бўлмаганда, синхрон генераторнинг алмашиини схемасининг параметрлари ўзгаришини аниқ баҳолаш имкониятини беради. Математик модел Matlab Simulink дастури ёрдамида яратилади.

**Таянч иборалар:** синхрон генератор, ўз-ўзидан тебраниш, синхронизм, математик модель, электромеханик турғунсизлик, демпфер коэффициент.

**Аннотация:** Предложена математическая модель самораскачивания синхронного генератора на базе полных уравнений Парка-Горева, представленных во взаимной системе относительных единиц. Данный метод позволяет наиболее точно оценить изменение параметров схемы замещения синхронного генератора при отсутствии достоверных сведений о магнитных свойствах материалов, применяемых при проектировании и изготовлении электрические машины. Реализация математической модели осуществляется в среде Simulink Matlab.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, самораскачивания, синхронизм, математическая модель, электромеханический неустойчивость, демпферный коэффициент.

**Abstract:** Is Offered mathematical model self-recovery synchronous generator on the base of the full equations Parka-Goreva, presented in mutual system of the relative units. The givenned method allows most exactly value change a parameter schemes **замещения** synchronous generator in the absence of reliable information about magnetic characteristic material, applicable when designing and fabrication electric machines. The Realization to mathematical model is realized in ambience Simulink Matlab.

**Keywords:** synchronous generator, self-recovery, synchronism, mathematical model, electromechanic vagary, damper factor.

Самораскачивание – это вид электромеханической неустойчивости генератора, когда у его ротора, вращающегося с основной эксплуатационной скоростью при некотором значении угла, появляются колебательные изменения скорости и угла с увеличивающейся амплитудой вплоть до выпадения из синхронизма.

В энергосистеме могут также происходить колебательные изменения скоростей и углов роторов генераторов с невозрастающими амплитудами. Такие изменения известны как синхронные качания генераторов.

Самораскачивание генераторов может появиться по различным причинам. Из них выделяют три обобщенных причины, а именно:

- наличие большого активного сопротивления в статорной цепи;
- наличие зоны нечувствительности или запаздывание действия устройства АРВ;
- неправильная настройка устройства АРВ.

Рассмотрим обобщенно проявление каждой из этих причин:

**Самораскачивание при наличии большого активного сопротивления в статорной цепи.** Для иллюстрации влияния активного сопротивления в статорной цепи

на самораскачивание генератора используем уточненное уравнение в котором вторым членом в левой части приближенно учитывается влияние демпферных контуров и внешней электрической сети на движение его ротора.

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = P_m - P_{эм} \quad (1)$$

где

$T_j = \frac{J_0 \omega_0^2}{S_{ном}}$  – постоянная инерции ротора,

$J_0$  – момент инерции ротора,

$P_m$  – мощность турбины,

$P_{эм}$  – электромагнитная мощность генератора,

$\delta$  – угловое положение ротора, все составляющие представлены в системе относительных единиц:  $T_j$  [рад];  $t$  [рад];  $\delta$  [рад];  $P_T$  [о.е.];  $P$  [о.е.].

Коэффициент  $D$  в этом уравнении, называемый демпферным коэффициентом, обобщенно отражает совокупное влияние всех демпфирующих факторов, а его значение зависит от интенсивности воздействия этих факторов. Ранее исследованиями [1,2] установлено, что при увеличении содержания активной составляющей в эквивалентном сопротивлении электрической сети демпферный коэффициент уменьшается и при некотором значении становится отрицательным, что является условием возможного появления самораскачивания генератора. Для иллюстрации влияния этого коэффициента проведем линеаризацию «в малом» уравнения (1) и запишем соответствующее характеристическое уравнение:

$$T_j \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d\Delta \delta}{dt} + \frac{dP}{d\delta} \Delta \delta = 0; \quad (2)$$

$$T_j p^2 + Dp + \frac{dP}{d\delta} = 0; \quad (3)$$

Общее решение линейного дифференциального уравнения (2) имеет вид:

$$\Delta \delta(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}, \quad (4)$$

где  $p_1, p_2$  – корни характеристического уравнения (3):

$$p_{1,2} = \frac{D \pm \sqrt{D^2 - 4T_j \frac{dP}{d\delta}}}{2T_j}. \quad (5)$$

В случае, когда  $D < 0$  и  $D^2 - 4T_j \frac{dP}{d\delta} < 0$ , корни  $p_1, p_2$  характеристического уравнения (3) представляет собой комплексно-сопряженную пару  $p_{1,2} = -\alpha \pm j\nu$  с положительной вещественной частью  $\alpha$ , а решение (4) приобретает вид

$$\Delta \delta(t) = C_1 e^{(\alpha + j\nu)t} + C_2 e^{(\alpha - j\nu)t} = e^{\alpha t} (C_1 e^{j\nu t} + C_2 e^{-j\nu t}), \quad (6)$$

где  $C_1 = A + jB$ ,  $C_2 = A - jB$  – комплексно-сопряженная пара произвольных постоянных.

С использованием формул перехода к гармоническим функциям (формулы Эйлера) решение (6) преобразуется к виду:

$$\Delta \delta(t) = 2C e^{\alpha t} \cos(\nu t - \varphi), \quad (7)$$

где  $C = \sqrt{A^2 + B^2}$ ;  $\varphi = \arctg \frac{B}{A}$ .

В полученном решении сомножитель  $e^{\alpha t}$  при  $\alpha > 0$  увеличивает амплитуду гармонической функции по мере возрастания времени  $t$  (рис.1) [1].

Колебательный процесс с возрастанием амплитуды указывает на наличие колебательной неустойчивости - самораскачивания ротора генератора.

Следует отметить, что современные системы АРВ при правильной их настройке способны подавлять самораскачивание роторов генераторов, обусловленное большими активными сопротивлениями в их статорных цепях [1].

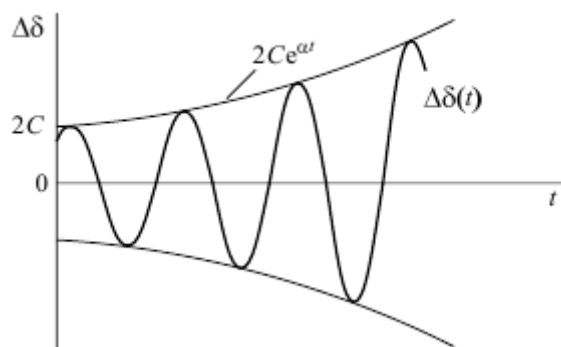


Рис.1. Решение уравнения (7) и (1), отражающее самораскачивание ротора генератора

**Самораскачивание при неправильной настройке автоматического регулятора возбуждения.** Типичным примером неправильной настройки АРВ СД является случай, когда чрезмерно увеличен коэффициент усиления по отклонению напряжения  $k_{OU}$ , а коэффициенты усиления по производным (коэффициенты каналов стабилизации) находятся вне области устойчивости. В этом случае самораскачивание может возникнуть не только в зоне искусственной устойчивости, но и в других режимах, даже при очень малой нагрузке генераторов [1].

Имитационная модель в пакете MATLAB/ Simulink. Первоначально была собрана математическая модель, общая блок-схема которой приведена на рис. 3. Для этого использовались математические элементы из основной библиотеки «Simulink» и элементы, моделирующие процессы в трехфазных цепях, из дополнительной библиотеки «SimPowerSystems» [2].

На рис. 8 синхронный генератор «SG» моделируется трехфазным элементом «Simplified Synchronous Machine pu Units (SSM)». На входы «Pm» и «E» подаются константы, отвечающие за мощность на валу ротора и ЭДС генератора. Отбор мощности на собственные нужды генератора «AP» выполнен элементом «Three-Phase Series RLC Load». Для моделирования трансформаторов «T1» и «T2» применены элементы «Three-Phase Transformer», выполненные в двухобмоточном исполнении со схемами соединения обмоток. Двухцепная линия представлена в модели двумя параллельными элементами «Three-Phase PI Section Line», обозначенными как «L1» и «L2». В качестве энергосистемы «PS» применен элемент «Three-Phase Source», представляющий собой трехфазный источник питания с неизменной ЭДС [2].

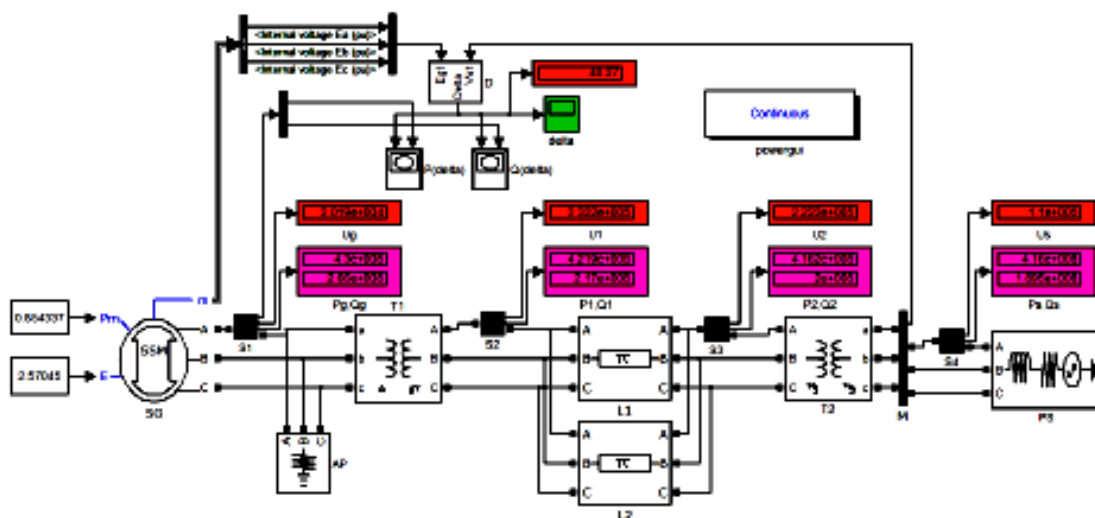


Рис.8. Модель синхронного генератора в пакете MATLAB/Simulink [3]

Измерение режимных параметров цепи в модели реализовано блоками «S1»–«S4». Логическая схема для одного такого блока показана на рис. 9. На схеме по мгновенным значениям фазного тока и фазного напряжения вычисляются действующее значение линейного напряжения  $U(t)$  и величины активной  $P(t)$  и реактивной  $Q(t)$  мощностей, протекающих в цепи [2].

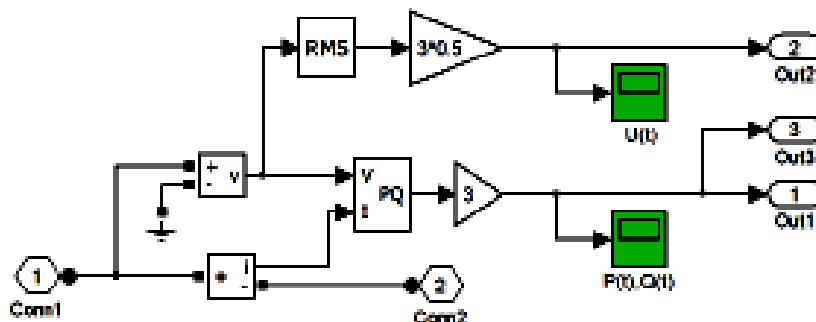


Рис.9. Блок измерителя мощности и напряжения в электрической цепи [2]

Для измерения угла  $\delta$  собран блок «D», логическая схема которого представлена на рис. 10. В блоке угол цепи передачи «Delta» вычисляется как угловая разница между ЭДС генератора «Eg1» и напряжением энергосистемы «Vs1» с учетом фазосдвигающего действия повышающего трансформатора «T1». Вычисление углов реализовано через блок «3-Phase Sequence analyzer», выделяющий амплитуду и фазу составляющей прямой последовательности основной частоты [3].

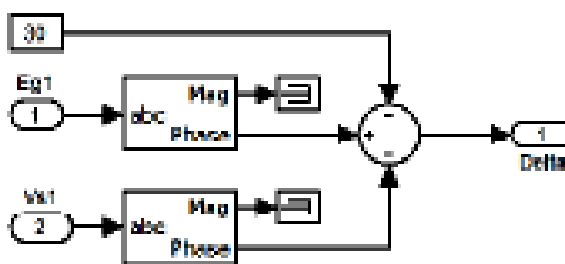


Рис.10. Блок измерителя угла  $\delta$  цепи передачи [3]

Для удобства величины напряжений в узлах цепи передачи и активной и реактивной мощностей в её ветвях, измеряемые посредством блоков «S1»–«S4», выводятся на экран через элементы «Display». С целью визуализации зависимостей мощностей цепи передачи от угла  $\delta$  использованы графические элементы «XY scope» [3].

Моделирование в MATLAB/Simulink проводилось в два этапа. Первоначально с помощью блока «powergui» (кнопка «Load Flow and Machine Initialization») рассчитывался установившийся режим сети и определялись режимные параметры синхронного генератора, при этом задавались либо активная мощность и напряжение на его выводах, либо его активная и реактивная мощности. Затем выполнялся расчет мгновенных значений токов и напряжений в обмотках элементов схемы и других параметров в зависимости от времени [3].

Упрощенный блок синхронной машины моделирует как электрическую так и механическую характеристики простой синхронной машины, модель выполнена в двух вариантах: Simplified Synchronous SI Units (параметры машины задаются в системе единиц СИ) и Simplified Synchronous Machine pu Units (параметры машины задаются в системе относительных единиц). В зависимости от варианта входные и выходные переменные машины также измеряются в системе единиц СИ или в относительных единицах [2].

На выходном порту  $m$  формируется векторный сигнал, состоящий из 12

элементов: токов ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ), напряжений ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ) и ЭДС ( $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$ ) обмотки статора, углового положения ( $\theta_{\text{etam}}$ ) и угловой частоты вращения ротора ( $\omega_m$ ), а также электромагнитной мощности ( $P_e$ ). Для удобства извлечения переменных машины из выходного вектора измеряемых переменных в библиотеке SimPowerSystems предусмотрен блок Machines Measurement Demux [3].

Сигнал, равный механической мощности на валу машины, подается на входной порт  $P_m$ , а на входной порт  $E$  подается сигнал, задающий действующее значение линейных ЭДС обмотки статора [3].

Механическая часть модели описывается уравнениями:

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_m - T_e) dt - K_d \Delta\omega(t),$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0$$

где  $\Delta\omega(t)$  - отклонение угловой частоты вращения ротора от синхронной;

$H$  - момент инерции ротора;

$T_m$  - механический момент;

$T_e$  - электромагнитный момент;

$K_d$  - коэффициент демпфирования;

$\omega(t)$  - угловая частота вращения ротора;

$\omega_0$  - синхронная угловая частота вращения (о.е.) [4].

На рис. 11. представлена структурная схема механической части модели [2, 4].

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования.

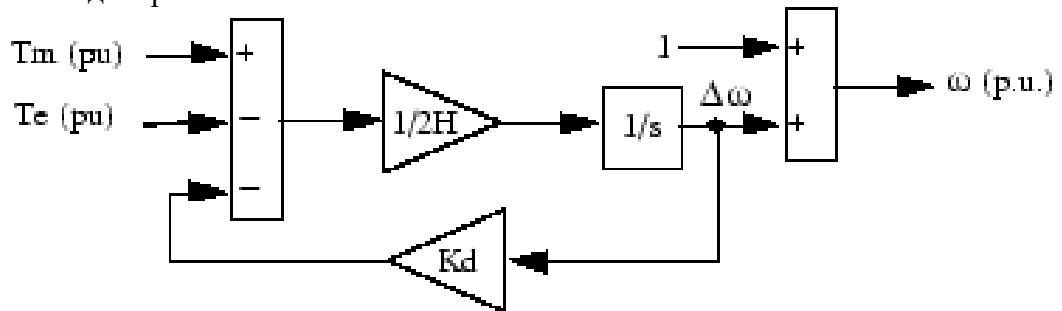


Рис.11. Структурная схема механической части модели.

Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее устойчивость и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems (в дальнейшем SPS-модели) можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MATLAB, что дает практически не ограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Механический вход позволяет вам, чтобы выбирать или вращающий момент прилагал к валу или скорость ротора как сигнал Simulink прилагал к блочному вкладу. Выберите механическую мощность  $P_m$ , чтобы определять механический силовой вклад, параметры машины задаются в системе единиц СИ или параметры машины задаются в системе относительных единиц pu, и маркировании изменения блочного вклада на  $P_m$ .

На рис.12 приведена изменения ток статора в системе относительных единиц (pu) и отклонения угла ротора в системе единиц (SI) во время самораскачивания синхронного генератора мощностью 200 МВА, скорость вращения ротора 1500 об/мин, на неправильной настройке автоматического регулятора возбуждения при моделирование в среде Simulink Matlab.

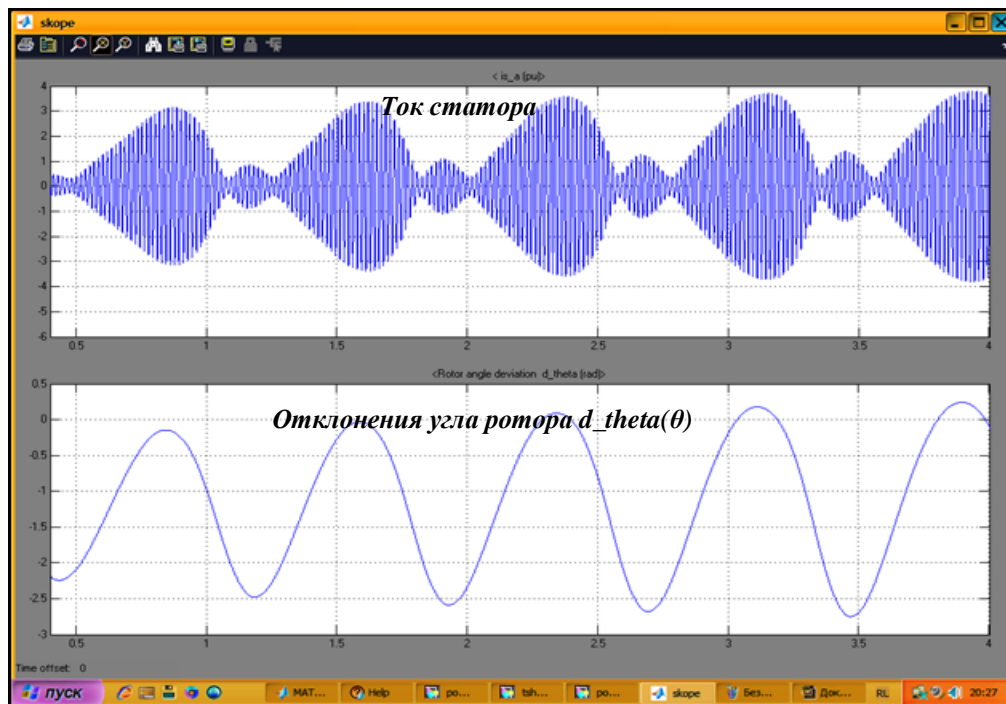


Рис.12. График самораскачивания синхронного генератора при неправильной настройке автоматического регулятора возбуждения.

Таким образом, во время самораскачивания синхронного генератора, ток статора колеблется с некоторой амплитудой и отклонения угла ротора возрастает, после чего генератор выходит из синхронизма.

Список использованной литературы:

1. Хрущев Ю.В., Заповодников К.И., Юшков А.Ю. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие. Томский политехнический университет. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. – ст 48-53.
2. И.В. Черных Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. -172-175 стр.
3. Файзиев М.М., Курбанов Н.А., Имомназаров А.Б., Бобоназаров Б.С., Бекишев А.Е. Моделирование неявнополюсного синхронного генератора в Matlab. – Москва. Вестник науки и образования 2017 №5(29) Том1, стр10–14.
4. Пирматов Н.Б, Бекишев А.Е, Курбанов Н.А. Моделирования самораскачивания синхронного генератора в среде Simulink Matlab. Тенденции и Перспективы Развития науки и образования в условиях глобализации. –Переяслав-Хмельницкий. 2018 №42, стр 585-589.