

## УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

*Джунуев Телеген, д.т.н., профессор, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66. Тел: 0312-54-51-30, e-mail: [dzhunuev@bk.ru](mailto:dzhunuev@bk.ru) ORCID ID [0000-0002-7562-5991](https://orcid.org/0000-0002-7562-5991)*

*Джунуев Тимур Тилегенович, старший преподаватель, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66. Тел: 0312-54-51-30, e-mail: [timaaha@mail.ru](mailto:timaaha@mail.ru) ORCID ID [0000-0001-6143-2606](https://orcid.org/0000-0001-6143-2606)*

*Конушбаева Динара Токтобековна, преподаватель, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66. Тел: 0312-54-51-30, ORCID ID [0000-0002-2164-7853](https://orcid.org/0000-0002-2164-7853)*

*Абдылдаев Сулайман Абдылдаевич, магистр, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66. e-mail: [s\\_abdyldaev@list.ru](mailto:s_abdyldaev@list.ru) ORCID ID [0000-0003-2279-1053](https://orcid.org/0000-0003-2279-1053)*

**Аннотация:** Упрощение полных уравнений Парка-Горева при приближенных исследованиях электромеханических переходных процессов синхронных машин достигается за счет исключения трансформаторных э.д.с. в контурах статора  $r_{\psi a}$ ,  $r_{\psi q}$  и э.д.с. скольжения  $s\psi_a$ ,  $s\psi_q$ . Обычно не учитывают и активные сопротивления статора.

Поэтому всегда возникает вопрос о том, какими воспользоваться уравнениями: полными, и при этом усложнить моделирование или упрощенными. Приведенные в статье системы уравнений полностью отражают как переходный, так и установившийся режим синхронной машины.

При переменной скорости последнее тождество нарушается и при строгом решении должны учитываться члены, содержащие ускорение, так как изменяющиеся потокосцепления

являются функцией двух переменных – времени и скольжения. Этими дополнительными членами и обусловлена разница между статическими и динамическими асинхронными характеристиками.

Рекомендация получать момент делением мощности на относительную скорость ротора не очевидно.

Для электрических машин малой мощности с малыми инерционными постоянными, где изменение скорости существенно, мощность и электромагнитный момент численно не равны и должны рассчитывается раздельно по известным формулам.

Для крупных машин влияние ускорение на переходные процессы незначительны и замена электромагнитного момента мощностью оправдано.

Синхронные генераторы малой мощности должны представляться полными уравнениями Парка – Горева.

**Ключевые слова:** Электромеханические процессы, синхронная машина, статор, ротор, электромагнитный момент, погрешность, напряжение, ток, установившийся режим, активное сопротивление, потокосцепление.

### SIMPLIFIED MODEL OF A SYNCHRONOUS MACHINE IN ASYNCHRONOUS REGIME

*Dzhunuev Telegen, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyrgyzstan, 720044, c.Bishkek, KSTU named after I.Razzakov. Phone: 0312-54-51-30, e-mail: [dzhunuev@bk.ru](mailto:dzhunuev@bk.ru) ORCID ID [0000-0002-7562-5991](https://orcid.org/0000-0002-7562-5991)*

*Dzhunuev Timur Tilegenovich, senior lecturer, Kyrgyzstan, 720044, c.Bishkek, KSTU named after I.Razzakov. Phone: 0312-54-51-30, e-mail: [timaaha@mail.ru](mailto:timaaha@mail.ru) ORCID ID [0000-0001-6143-2606](https://orcid.org/0000-0001-6143-2606)*

*Konushbaeva Dinara Toktobekovna, teacher, Kyrgyzstan, 720044, c.Bishkek, KSTU named after I.Razzakov. Phone: 0312-54-51-30, ORCID ID [0000-0002-2164-7853](https://orcid.org/0000-0002-2164-7853)*

*Abdyldaev Sulaiman Abdyldaevich, Master, Kyrgyzstan, 720044, c.Bishkek, KSTU named after I.Razzakov. e-mail: [s\\_abdyldaev@list.ru](mailto:s_abdyldaev@list.ru) ORCID ID [0000-0003-2279-1053](https://orcid.org/0000-0003-2279-1053)*

**Abstract:** Simplification of the complete Park-Gorev equations with approximate investigations of electromechanical transient processes of synchronous machines is achieved by eliminating transformer emfs. in the stator  $p\psi_a$ ,  $p\psi_q$  and emf circuits slip  $s\psi_a$ ,  $s\psi_q$ . Normally, the active resistance of the stator is not taken into account.

Therefore, the question always arises of which ones to use the equations: complete, and at the same time complicate the simulation or simplified ones. The systems of equations presented in this paper completely reflect both the transient and steady state of a synchronous machine.

At a variable speed, the last identity is violated and, with a rigorous solution, the terms containing acceleration must be taken into account, since the changing flux linkages are a function of two variables - time and slip. These additional terms also determine the difference between static and dynamic asynchronous characteristics.

The recommendation to obtain a torque by dividing the power by the relative rotor speed is not obvious.

For low-power electric machines with small inertial constants, where the change in speed is significant, the power and the electromagnetic moment are not numerically equal and must be calculated separately from the known formulas.

For large machines, the effect of acceleration on transients is negligible and the replacement of the electromagnetic moment by power is justified.

Synchronous generators of low power must be represented by the complete Park-Gorev equations.

**Key words:** Electromechanical processes, synchronous machine, stator, rotor, electromagnetic moment, error, voltage, current, steady state, active resistance, flux linkage.

При приближенных исследованиях электромеханических процессов синхронных машин уравнения Парка-Горева (1) [1÷7]:

$$\begin{aligned} -P\Psi_d + \omega\Psi_q - r i_d &= U_d \\ -P\Psi_q + \omega\Psi_d - r i_q &= U_q \\ P\Psi_f + r_f i_f &= U_f \\ P\Psi_{kd} + r_{kd} i_{kd} &= 0 \\ P\Psi_{iq} + r_{iq} i_{iq} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k=1,2,\dots,n$ ,  $i=1,2,\dots,m$ .

упрощают за счет исключения трансформаторных э.д.с. в контурах статора  $P\Psi_a$ ,  $P\Psi_q$  и э.д.с. скольжения  $s\Psi_a$ ,  $s\Psi_q$ . Обычно не учитывают и активные сопротивления статора. После этого уравнения для контуров статора принимают вид:

$$- \Psi_q = u_d, \quad \Psi_d = u_q. \quad (2)$$

В решении такой упрощенной системы уравнений не будут учтены свободные тока статора и моменты, обусловленные этими токами. Токи по осям  $d$  и  $q$ , связанные процессами в роторных контурах, определяются одновременным отбрасыванием слагаемых  $P\Psi_d$ ,  $P\Psi_q$ ,  $s\Psi_d$ ,  $s\Psi_q$ , как будет показано ниже, погрешности при этом взаимно компенсируются.

Поскольку при моделировании всегда возникает вопрос о том, какими воспользоваться уравнениями: полными, и при этом усложнить моделирование или упрощенными, то остановимся на этом более подробно.

Приведенная выше система уравнений (1) полностью отражают как переходный, так и установившийся режим синхронной машины. Переходный процесс возникает при внезапном изменении приложенных напряжений, момента на валу или величины напряжения возбуждения.

Из первых двух уравнений системы (1) видно, что всякие мгновенные изменения  $u_d$ ,  $u_q$  (например, при коротких замыканиях) в первый момент компенсируются производными  $P\Psi_d$ ,  $P\Psi_q$ . Последующий свободный процесс и определяется этими уравнениями, решение которых дает колебательный затухающий процесс, в системе же неподвижных относительно статора осей он проявляется как апериодический затухающий. Апериодические токи, наблюдающиеся в статорных контурах при изменениях режима, и является отражением этого процесса.

В установившемся или квазиустановившемся режиме, когда  $u_d$ ,  $u_q$ ,  $s$  и др. изменяются много медленнее, чем свободные параметры режима в статорных цепях, трансформаторные э.д.с.  $P\Psi_d$  и  $P\Psi_q$  оказываются равными нулю или имеют ничтожно малую величину, так что с ними можно не считаться. Однако и в установившемся асинхронном режиме при постоянном скольжении членами  $P\Psi_d$  и  $P\Psi_q$  также можно пренебречь, если отбрасывать и члены  $s\Psi_d$ ,  $s\Psi_q$ . Одновременно следует отбрасывать и члены с активным сопротивлением статора. Последнее можно объяснить следующим. При постоянном скольжении [3] напряжения по осям и потокосцепления изменяются синусоидально с частотой скольжения. Если обозначить наибольшие значения этих величин по осям  $U_m$ ,  $\Psi_{dm}$ ,  $\Psi_{qm}$ , то мгновенные значения напряжения будут:

$$u_q = U_m \cos st; \quad u_d = U_m \cos(st + 90^\circ) = -U_m \sin st.$$

Примем, что потокосцепления сдвинуты относительно оси отсчета на угол  $\alpha_0$ , тогда

$$\psi_q = \psi_{qm} \sin(st + \alpha_0); \quad \psi_d = \psi_{dm} \cos(st + \alpha_0).$$

и уравнения (1) с учетом ранее высказанных допущений ( $r=0$ ), будут:

$$\left. \begin{aligned} -\bar{p}\psi_d - (1+s)\psi_q &= u_d; \\ (1+s)\psi_d - \bar{p}\psi_q &= u_q. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Подставляем в последние уравнения, записанные выше мгновенные значения напряжений и потокосцеплений:

$$\begin{aligned} (\psi_{dm}s - \psi_{qm} - \psi_{qm}s)\sin(st + \alpha_0) &= u_d; \\ (-\psi_{dm} + \psi_{qm}s - \psi_{qm}s)\cos(st + \alpha_0) &= u_q. \end{aligned}$$

Поскольку наибольшие значения  $u_d$  и  $u_q$  равны, то и наибольшие значения потокосцеплений между собой также будут равны, т.е.  $\psi_{dm} = \psi_{qm}$ . Члены  $\psi_{dm}s$  и  $\psi_{qm}s$  взаимно уничтожаются, таким образом,

$$-\psi_q = u_d; \quad -\psi_d = u_q \quad (4)$$

а следовательно, при принятых допущениях ( $s=\text{пост}$  и  $r=0$ ) и синусоидально изменяющихся  $u_d$  и  $u_q$

$$-\bar{p}\psi_d - s\psi_q = -\bar{p}\psi_q - s\psi_d = 0. \quad (5)$$

Уравнения же роторных контуров остаются теми же самыми, что и в (1.68). Отсюда следует, что во всех установившихся режимах, включая и асинхронные при постоянной скорости, при допущении  $r=0$  можно отбрасывать трансформаторные э.д.с. статора  $p\psi_d$ ,  $p\psi_q$  при обязательном пренебрежении и э.д.с. скольжения  $s\psi_d$ ,  $s\psi_q$ .

При переменной скорости последнее тождество нарушается и при строгом решении должны учитываться члены, содержащие ускорение, так как изменяющиеся потокосцепления являются функцией двух переменных – времени и скольжения. Этими дополнительными членами и обусловлена разница между статическими и динамическими асинхронными характеристиками.

Широко распространенное допущение о замене в уравнении движения, записанном в относительных единицах, электромагнитного момента мощностью, имея в виду, что при симметричной нагрузке, синхронной скорости и отсутствии потерь в активном сопротивлении обмотки статора момент и мощность численно равны. Иногда, однако, рекомендуется получать момент делением мощности на относительную скорость ротора, когда эта скорость отличается от синхронной. Однако законность такой замены не очевидна [8]. На этом остановимся подробнее.

Связь между моментом и мощностью машины можно установить на основе следующих известных выражений в относительных единицах для момента

$$m_{\text{ЭМ}} = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (6)$$

Для мощности

$$P = u_d i_d - u_q i_q \quad (7)$$

Исключая из последнего уравнения  $u_d$  и  $u_q$  получаем:

$$P = -(i_d \bar{p}\psi_d + i_q \bar{p}\psi_q) + (1+s)(\psi_d i_q + \psi_q i_d) - (i_d^2 + i_q^2)r. \quad (8)$$

Второй член представляет электромагнитный момент, умноженный на относительную скорость движения ротора, третий – потери в статоре.

Последнее выражение при  $r=0$  может быть преобразовано к виду

$$P = -(i_d \bar{p}\psi_d + i_q \bar{p}\psi_q) + (\psi_d i_q s + \psi_q i_d s) + m_{ЭМ} = m_{ЭМ} - i_d (\bar{p}\psi_d + \psi_q s) - i_q (\bar{p}\psi_q + \psi_d s). \quad (9)$$

Отсюда видно, что при упрощенном моделировании, когда пренебрегают активными сопротивлениями в статоре и когда скорость движения предполагается постоянной, но не обязательно синхронной, замена в относительных единицах момента мощностью возможна, при этом никакой поправки на действительную скорость ротора делать не требуется.

При этом одновременно предполагается, что частота и амплитуда в узле, к которому подключена синхронная машина, остаются постоянными.

При решении упрощенных уравнений в осях  $d$  и  $q$  получается полное соответствие с решением по полным уравнениям только при постоянной скорости вращения ротора, пренебрежении активным сопротивлением статора и отсутствии коммутаций во внешней сети. Вместе с тем упрощенные уравнения широко используются и для решения задач, не отвечающих этим условиям. Учет изменения скорости существен главным образом для машин с малыми инерционными постоянными, т.е., как правило, для мелких машин. Поэтому, там, где можно ожидать больших ускорений моделировать следует по полным уравнениям. У крупных машин, с которыми обычно сталкиваются энергетики, влияние ускорения на переходные процессы невелики.

Для перехода к упрощенным уравнениям пришлось принять сопротивление статора равным нулю. Однако во многих задачах учет активных сопротивлений статора оказывается необходимым, так как активные потери в обмотках статора иногда бывают большими. В то же время при их учете упрощенные уравнения даже при постоянной скорости вращения становятся неправомерными. Неучет же активных сопротивлений приводит к еще большим численным ошибкам. Проведенные сравнительные расчеты показали целесообразность учета активных сопротивлений и при упрощенных уравнениях для машин средней и малой мощности. Для этого потокосцепления  $\psi_d$  и  $\psi_q$  можно находить по выражениям

$$\psi_d = u_q + r i_q; \quad -\psi_q = u_d + r i_d. \quad (10)$$

При коммутациях в цепи статора возникают аperiodические токи, которые при решении полных уравнений отражаются в величинах моментов. При упрощенном моделировании аperiodические токи не принимаются во внимание, а, следовательно, не будут учитываться и моменты, обусловленные ими. Однако их можно учесть приближенно введением дополнительного момента. Этот дополнительный тормозящий момент определяется двумя слагаемыми: моментом, связанным с потерями в сопротивлении статорной цепи от аperiodического тока, и асинхронным моментом, возникающим при вращении ротора относительно неподвижного в пространстве аperiodического потока [9, 10]. Первая слагаемая невелика и ее можно не учитывать, вторая при близких коротких замыканиях может достигать значительной величины. Она затухает с постоянной времени в 2 раза меньшей постоянной времени аperiodической слагающей тока  $\tau_a$ :

$$m_{\text{торм}} = U^2 m_{a.cs=1} e^{-\frac{2t}{\tau_a}}, \quad (11)$$

где  $U^2$  – напряжение на зажимах машины в относительных единицах до короткого замыкания;  $m_{a.cs=1}$  может быть получено экспериментально на неподвижной машине.

Для определения  $m_{a.cs=1}$  могут быть использованы и приближенные формулы:

$$m_{a.cs=1} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_d'^2} + \frac{1}{x_q'^2} \right) 2(r_2 - r) \quad (12)$$

для явнополюсных машин и

$$m_{a.cs=1} = \frac{\sqrt{2}}{x_d''^2} (r_2 - r) \quad (13)$$

для неявнополюсных машин.



Здесь  $r_2$  – активное сопротивление токам обратной последовательности. если короткое замыкание происходит за внешним сопротивлением, то его следует включить в сверхпереходные сопротивления генератора.

- Для электрических машин малой мощности с малыми инерционными постоянными, где изменение скорости существенно, мощность и электромагнитный момент численно не равны и должны рассчитываться раздельно по известным формулам.
- Для крупных машин влияние ускорения на переходные процессы незначительно и замена электромагнитного момента мощностью оправдано.
- Синхронные генераторы малой мощности должны представляться полными уравнениями Парка – Горева.

При обычных изменениях скорости роторов синхронных машин, имеющих место при электромеханических переходных процессах в электрических системах, погрешности за счет ускорения, как правило, ниже погрешностей модели.

На рис. 1 (а, б) приведены кривые изменения полного тока статора и электромагнитного момента, рассчитанные по полным и упрощенным уравнениям в предположении, что ускорение постоянно, т.е. скольжение неизменно.

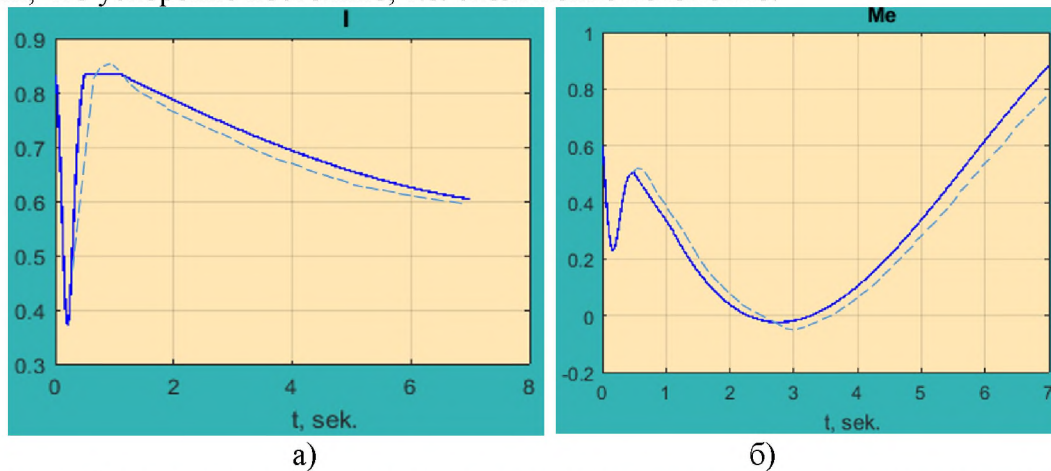


Рис. 1. Кривые изменения тока статора (а) и электромагнитного момента (б)

Из кривых изменения параметров режима видно, что расчеты по полным уравнениям (сплошные) и упрощенным (пунктиром) практически совпадают и переход на упрощенные уравнения при квазиустановившихся электромеханических переходных процессах вполне оправдан.

### Список литературы

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. [Текст]/ Учебник для электроэнергетических спец. вузов. / В.А. Веников - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высшая школа. 1970. - 472 с., с ил.
2. Веников В.А. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей. Веников В.А., Жуков Л.А., Поспелов Г.Е.//Под ред. Веникова В.А. - Высшая школа, 1975, - 344 с.
3. Джунуев Т.Т. Допустимость применение НАПВ на линии 110 кВ, соединяющей ТЭЦ с системой соизмеримой мощности. Теоретический и прикладной научно-технический журнал «Известия», КГТУ, №3(36), 2015, 173-176с.
4. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. [Текст]/ Учебник для электроэнергетических и энергетических вузов и факультетов. - М.: Энергия, 1970.
5. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. [Текст]/ Жданов П.С.// Под ред. А.Жукова. - М.: Энергия, 1979. - 456 с. ил.

6. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. [Текст]/ А.И.Важнов. - Л.: Энергия, 1980. - 255 с.

7. Джунуев Т.Т. Определение балансирующего узла ЭЭС ограниченной мощности. Теоретической и прикладной научно – технический журнал Известия, КГТУ, № 32 (часть 1), 2014.

8. Соколов Н.И. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. [Текст]/ Под ред. Н.И. Соколова. М.: Энергия, 1970.- 400 с. с ил.

9. Лоханин Е.К. Методика расчёта и анализа длительных переходных режимов. [Текст]/ Лоханин Е.К.//Электричество, 1995№ 12.

10. Джунуев Т. Исследование характеристик мощности генераторов в электроэнергетической системе ограниченной мощности [Текст] / Т. Джунуев // Сборник трудов шестой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, том 1, Электроэнергетика, Благовещенск, 2011. - 9 с.

**УДК 621. 311. 15**

### **ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СТАТИЗМА НА ВЕЛИЧИНУ ДЕФИЦИТА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ**

*Кожоналиева Айнура Кыдырбековна, преподаватель, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова, 66, [Akozhonalieva@bk.ru](mailto:Akozhonalieva@bk.ru), [orcid.id 0000-0001-6079-1367](http://orcid.id/0000-0001-6079-1367)*

**Аннотация:** Отклонение частоты тесно связано с величиной активной мощности. Баланс выработанной источниками электроэнергии должен соответствовать потребляемой мощности, тогда частота будет номинальной. При нарушении баланса частота изменяется, и последствия могут быть отрицательными. Для устранения отрицательного влияния необходимо соблюдать баланс путем изменения активной мощности. Автоматическое управление частотой напряжения генератора осуществляется автоматическими регуляторами частоты вращения (**АРЧВ**) гидравлических и паровых турбин. Основная задача автоматического управления активной мощностью (регулирование частоты) – определить выработку и передачу активной мощности при наименьшем удельном расходе топлива (газ, уголь, мазут) и воды. Она решается оптимизацией режимов работы гидро и турбогенераторов по активной мощности. В связи с указанными различными режимами работы и участием гидро - турбогенераторов, в автоматическом регулировании частоты и активной мощности для АРЧВ и турбогенераторов - статические **ПИД** – регуляторы, а для гидрогенераторов - астатические **ПИ** - регулятора. В зависимости от вида регулятора статизма, частотные характеристики могут быть различными. Гидравлический АРЧВ паровых турбин выполнен на универсальных элементах: центробежный измеритель преобразователя частоты вращения в давления масла, гидромеханический элемент сравнения давления, усилитель в виде гидравлического двигателя двухстороннего действия, автоматический регулятор статический пропорционального действия.

**Ключевые слова:** частота, регулирование, активная мощность, баланс, дефицит, статизм, регулятор, астатическое, статическое, отклонение, коэффициент.

### **INFLUENCE OF COEFFICIENT OF CONSTANT-ERROR BEHAVIOUR ON VALUE OF THE DEFICIT THE ACTIVE POWER IN CASE OF REGULATION OF FREQUENCY**

*Kozonalieva Ainura K., teacher, Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov av., 66, [Akozhonalieva@bk.ru](mailto:Akozhonalieva@bk.ru), [orcid.id 0000-0001-6079-1367](http://orcid.id/0000-0001-6079-1367)*