

## УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

## EQUATIONS OF ELECTROMECHANICAL TRANSITION PROCESSES IN A SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A PUMP UNIT

**Нуспеков  
Ерболат Лязатович**

*Кандидат технических наук, университет «Туран-Астана», Нур-Султан, Казахстан*



**Nuspekov  
Erbolat Ljzatovich**

*Candidate of Technical Sciences, University "Turan-Astana", Nur-Sultan, Kazakhstan*

**Таукенова  
Лязат Жумабаевна**

*Доктор по профилю, университет «Туран-Астана», Нур-Султан, Казахстан*

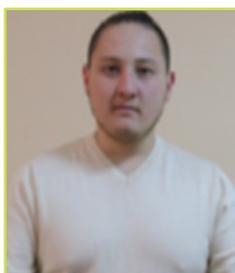


**Taukenova  
Ljzat Zhumabaevna**

*Doctor in profile, University "Turan-Astana", Nur-Sultan, Kazakhstan*

**Жумабаев  
Ержан Ныгметжанович**

*Специалист по сопровождению и эксплуатации ИС, «Академия Имиджелогии», Нур-Султан, Казахстан*



**Zhumabaev  
Erzhan Nygmetzhanovich**

*IS Maintenance and Operation Specialist, "Academy of Imageology", Nur-Sultan, Kazakhstan*

**Аннотация:** в статье предложена математическая модель расчета переходных процессов для детального учета жидкости трубопровода в аномальных режимах системы электроснабжения. Методика расчета позволяет достаточно точно отражать момент сопротивления насосного агрегата в аномальных режимах системы электроснабжения.

**Ключевые слова:** ротор, двигатель, мощность, электрическая сеть, дифференциальные уравнения, трубопровод.

**Abstract:** The article proposes a mathematical model for calculating transients for detailed accounting of pipeline fluid in abnormal modes of the power supply system. The calculation method allows to accurately reflect the moment of resistance of the pumping unit in abnormal conditions of the power supply system.

**Keywords:** rotor, engine, power, electrical network, differential equations, pipeline.

Уравнения электромеханических переходных процессов отражают закон движения ротора двигателя под воздействием электромагнитного момента и момента сопротивления механизма.

Для нахождения положения ротора обычно используют синхронно вращающуюся систему координат. Относительное положение ротора в такой системе координат определяется углом  $\delta$  между его поперечной осью и синхронно вращающейся осью, в качестве которой можно принять вектор напряжения питающей электрической сети [4]. В этом случае урав-

нение электромеханических переходных процессов в соответствии со вторым законом Ньютона представляются в виде [1]:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_{\text{мех}} - M_{\text{э}} \quad (1)$$

где  $T_j$  — электромеханическая постоянная времени агрегата двигатель-механизм;

$M_{\text{мех}} - M_{\text{э}}$  — момент сопротивления механизма и электромагнитный момент.

Момент сопротивления различных механизмов [2, 3], приведенный к номинальной мощности, характеризуется обобщенной зависимостью:

$$M_{\text{мех}} = \left[ M_0 + (k_3 - M_0) \omega^\gamma \right] \frac{P_{\text{НОМ}}}{S_{\text{НОМ}}} \quad (2)$$

Здесь  $M_0$  — начальный момент (при  $s = 1$  или  $\omega = 0$ );  $k_3$  — коэффициент загрузки двигателя в синхронном режиме ( $s = 0$ );  $\gamma$  — показатель степени, характеризующий зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения.

При правильном выборе  $M_0$ ,  $k_3$  и  $\gamma$  выражение (2) достаточно точно отражает моменты сопротивления типовых механизмов.

Электромагнитный момент, развиваемый синхронным двигателем (СД), определяется соотношением [2].

$$M_s = P / \omega_U \quad (3)$$

где  $P$  — активная мощность, потребляемая двигателем;  $\omega_U$  — частота напряжения на статорной обмотке.

При питании двигателя от электрической сети  $\omega_U = \omega_0$  и в относительных единицах  $M_s = P$  (4).

Активную и реактивную мощности, потребляемые СД в переходных процессах, целесообразно выразить через составляющие  $E''_q$  и  $E''_d$  сверхпереходной ЭДС. Используя соотношения [4], получаем

$$P = \frac{E''_q U}{x'_d} \sin \delta - \frac{E''_d U}{x'_q} \cos \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \sin 2\delta \quad (5)$$

$$Q = \frac{E''_q U}{x'_d} \cos \delta - \frac{E''_d U}{x'_q} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{\cos^2 \delta}{x'_q} + \frac{\sin^2 \delta}{x'_d} \right) \quad (6)$$

В качестве начальных условий для уравнений электромеханических переходных процессов (1) следует задать значение угла  $\delta$  и его производной  $d\delta / dt$  для момента времени  $t = 0$ . Поскольку параметры режима  $\delta$  и  $d\delta / dt = 2\pi f_0 s$  обладают свойством сохранять неизменным свое значение в первый момент времени при любых изменениях режима, то начальные условия можно вычислить из предшествующего режима.

Режим СД, подключенного к электрической сети с напряжением  $U$ , при напряжении на обмотке возбуждения  $U_f$  определяют следующие основные параметры:  $\delta$  — угол, характеризующий положение ротора относительно синхронно вращающейся оси (вектора напряжения  $U$  электрической сети);  $s$  — скольжение ротора двигателя (или  $\omega = 1 - s$  — частота вращения ротора);  $E''_d$ ,  $E''_q$  — составляющие сверхпереходной ЭДС двигателя по осям  $d$  и  $q$ ;  $E'_T = dE''_q / dt$  — производная от ЭДС  $E''_q$ . Эти параметры режима СД назовем основными. Через них относительно легко выражаются остальные параметры:  $P$ ,  $Q$  — активная и реактивная мощности, потребляемые двигателем из сети;  $I$  — ток в статорной обмотке;  $I_p$ ,  $I_{Id}$ ,  $I_{Iq}$  — токи в обмотке возбуждения и демпферных обмотках по осям  $d$  и  $q$ ;  $E_q$ ,  $E_d$  — составляющие синхронной ЭДС двигателя.

Основные параметры режима определяются следующей системой дифференциальных уравнений переходных процессов в СД:

$$\frac{d\delta}{dt} = 2\pi f_0 s \quad (7)$$

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_{\text{мех}} - M_s \quad (8)$$

$$E'_T = \frac{dE''_q}{dt} \quad (9)$$

$$T'_d T''_d \frac{dE'_T}{dt} + (T'_d + T''_d) E'_T = -E'_q + (T'_d + T''_d) \frac{x'_d - x''_d dU_q}{dt} + U_q \frac{x'_d - x''_d}{x_d} + \frac{x''_d}{x_d} E_{q\text{нов}} \left( U_f + T_{\sigma 3d} \frac{dU_f}{dt} \right) \quad (10)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = 2\pi f_0 s \quad (11)$$

которую необходимо дополнять соотношениями, выражающими через основные параметры режима момент сопротивления механизма (2) и электромагнитный момент (3), (4).

Начальными условиями системы дифференциальных уравнений (7)–(11) являются следующие:

$$\delta(0) = \delta(-0), \quad (12)$$

$$s(0) = s(-0), \quad (13)$$

$$E''_q(0) = E'_q(-0), \quad (14)$$

$$E'_T(0) = E'_T(-0) + \frac{T'_d + T''_d}{T'_d T''_d} \frac{x'_d + x''_d}{x'_d} \Delta U_q + \frac{x''_d}{x_d} \frac{T_{\sigma 3d}}{T'_d T''_d} E_{q\text{нов}} \Delta U_f \quad (15)$$

$$E''_d(0) = E'_d(-0), \quad (16)$$

Здесь индексом  $(-0)$  отмечены параметры предшествующего режима СД. Если СД подключен к электрической сети конечной мощности, то напряжение на статорной обмотке  $U$  зависит от режима двигателя. Для определения напряжения в этом случае необходимо решить уравнение напряжения электрической сети. Пусть СД вместе с прочей нагрузкой подключен к шинам, удаленным от источника ЭДС с неизменной величиной  $E_c$ , за сопротивление  $Z_c = R_c + jx_c$  (рис. 1). Активная и реактивная мощности прочей нагрузки учитывая по статическим характеристикам в зависимости от напряжения

$$\left. \begin{aligned} P_H &= P_0 U^{\gamma_1} \\ Q_H &= Q_0 U^{\gamma_2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где  $P_0$  и  $Q_0$  — активная и реактивная мощности прочей нагрузки при номинальном напряжении;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — показатели степени, характеризующие зависимость мощности прочей нагрузки от напряжения.

Суммарная мощность, потребляемая из электрической сети СД и прочей нагрузки, составит

$$\left. \begin{aligned} P_\Sigma &= P + P_0 U^{\gamma_1} \\ Q_\Sigma &= Q + Q_0 U^{\gamma_2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

В соответствии с расчетной схемой (рис. 1) напряжение в электрической сети можно выразить нелинейным алгебраическим уравнением

$$U = -\frac{P_{\Sigma}R_c + Q_{\Sigma}X_c}{U} + \sqrt{E_c^2 - \left(\frac{P_{\Sigma}x_c + Q_{\Sigma}R_c}{U}\right)^2} \quad (19)$$

которое необходимо решать совместно с уравнениями мощности (5), (6) и (8). Для этого воспользуемся методом Гаусса — Зейделя, который применительно к выражению (19) обладает хорошей сходимостью. Решение с точностью  $\varepsilon = 0,0001$  достигается за 5–10 шагов последовательных приближений.

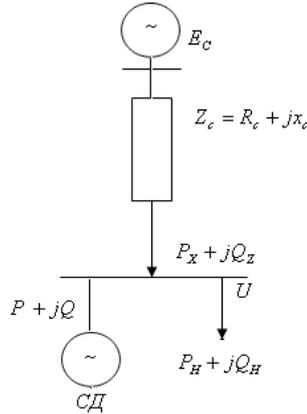


Рис. 1. Расчетная схема подключения СД

Напряжение на обмотке возбуждения СД, определяется типом возбудителя. Основные типы возбудительных устройств, применяемые СД, и соответствующие им законы изменения напряжения  $U_f$ , выраженные через основные параметры режима СД, подробно описаны в работе [4].

Система дифференциальных уравнений (7)–(11) при заданных начальных условиях (12)–(14) совместно с выражением (19) и уравнением напряжения на обмотке возбуждения  $U_f$  полностью определяет режим СД в переходных процессах.

Для детального учета переходных процессов жидкости трубопровода в аномальных режимах системы электроснабжения действительная величина  $\gamma$ , характеризующая зависимость момента сопротивления насоса от частоты вращения уточняется решением квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа, описывающих нестационарное движение жидкости в трубопроводе. Правильный расчет  $\gamma$  в выражении (2) достаточно точно отражает момент сопротивления насосного агрегата в аномальных режимах системы электроснабжения.

### Список литературы

1. Вишневский К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи / К.П. Вишневский. — М.: Агропромиздат, 1986. — 135 с.
2. Спромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И.А. Спромятников. — М.: Госэнергоиздат, 1963. — 528 с.
3. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей / Ю.М. Голоднов. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 136 с.
4. Гамазин С.И. Переходные процессы в системах электроснабжения с электродвигательной нагрузкой / С.И. Гамазин, Т.А. Садыбеков. — Алма-Ата: Гылым, 1991 — 302 с.