

## **ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ, СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ АВАРИЙНОМ ОТКЛЮЧЕНИИ ИХ ОТ СЕТИ**

**Чесноков И.П.<sup>1</sup>, Овчинников В.В.<sup>1</sup>, Арасланова И.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», Киров, Россия (610000, Киров, ГСП ул. Московская, 36), e-mail: [vzf\\_araslanova@vyatsu.ru](mailto:vzf_araslanova@vyatsu.ru)

---

Представлена принципиальная схема электрического торможения мощного синхронного насосного агрегата с целью снижения угонной частоты вращения при аварийном отключении двигателя от сети. Предложены методики расчёта параметров энергоёмкого резистора и выбора оптимальной величины его сопротивления для электрического торможения при уgone агрегата и работе в генераторном режиме, а также упрощённая математическая модель гидромеханических переходных процессов в проточном тракте насосного агрегата при его выбеге в случае потери питания синхронным двигателем. Предлагаемая схема электрического торможения и представленные согласно этой схеме методы расчётов позволяют выполнить исследования переходных процессов синхронных насосных агрегатов и оценить величины угонных частот вращения в широкой вариации параметров статорной цепи двигателя, в том числе и параметров энергоёмкого резистора, параметров его системы возбуждения и параметров гидравлического тракта конкретного насосного агрегата. Для проектных и эксплуатирующих организаций систем электроснабжения, имеющих мощные узлы силовых (двигательных) нагрузок.

---

Ключевые слова: насосный агрегат (НА), угонная частота, электрическое торможение, энергоёмкий резистор.

## **EQUIPMENT SELECTION, ELECTRIC BRAKING SCHEME AND MATHEMATICAL DESCRIPTION OF TRANSIENT PROCESS OF POWERFUL SYNCHRONOUS PUMPING UNIT UNDER EMERGENCY CUT OFF FROM POWER GRID**

**Chesnokov I.P.<sup>1</sup>, Ovchinnikov V.V.<sup>1</sup>, Araslanova I.V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>"Vyatka State University", Kirov, Russia (610000, Kirov, GSP Moskovskaya str., 36), e-mail: [vzf\\_araslanova@vyatsu.ru](mailto:vzf_araslanova@vyatsu.ru)

---

A schematic diagram of the electric braking synchronous pumping unit is presented in order to reduce the sudden decline in revolution during emergency disconnection of the engine from the grid. The methods for calculating the parameters of the energy-intensive resistor and selection of the optimal value of its resistance of electrical braking during overspeed mode of the unit's operation, its work in recuperating mode, as well as a simplified mathematical model of hydro-mechanical transients in the flow path of the pump unit at its overspeed in the synchronous motor's power shutdown are included. The proposed electric braking scheme and the submitted calculation methods make it possible to perform a study of transient processes of synchronous pumping units and to assess the value of overspeed within a wide range of parameters inside the stator-motor circuit, including the parameters of the energy-intensive resistor, its drive system and a particular hydraulic tract pump unit. For designing and servicing companies operating high-power systems.

---

Keywords: pumping unit (PU), overspeed, electric braking, energy-intensive resistor.

Как показывает практика, на насосных станциях магистральных каналов при аварийном отключении синхронного двигателя от источника питания вода, оставшаяся в напорном трубопроводе, воздействует на рабочее колесо и насосный агрегат (НА) начинает вращаться в обратном направлении. При этом угонная частота вращения может достигать величины больше номинальной. Это обуславливает значительные толчки и вибрации агрегата и всей конструкции в целом. Поэтому, для обеспечения надёжности работы насосных станций, фундаменты здания, как правило, изготавливают из монолитного железобетона. Процесс

возведения зданий и фундаментов насосных станций весьма трудоёмок и требует больших капитальных затрат и, кроме того, ведёт к увеличению сроков строительства объектов и ввода их в эксплуатацию. В этой связи возникает необходимость уменьшить время останова, величину угонной частоты вращения агрегата, что позволит снизить величину вибраций и пульсации давления в трубопроводах. Например, при снижении величины вибраций на 30% и более возможно строительство зданий насосных станций из сборного железобетона, что даёт значительный экономический эффект. Кроме того, снижение вибраций оборудования и пульсации давления в трубопроводах повышает надёжность работы оборудования, увеличивает его межремонтные сроки.

Одним из мероприятий снижения угонной частоты вращения является торможение насосного агрегата. Существует несколько способов торможения. Наиболее оптимальным способом торможения является электрический способ, суть которого заключается в подключении к зажимам синхронного двигателя, который аварийно отключился от сети, энергоёмкого резистора для поглощения энергии рассеяния при уgone НА.

Для исследования переходных процессов НА при электрическом торможении необходимо знать математическое описание электромеханических переходных процессов в цепи синхронного двигателя, в том числе и в резисторе, а также описание гидромеханических процессов в гидравлическом тракте НА.

Математическое моделирование электромеханических переходных процессов в электрической системе: питающая линия 110-220 кВ, блок мощный синхронный двигатель-трансформатор, энергоёмкий резистор, представленное в [1], позволяет исследовать различные асинхронные режимы (пуск, выбег, самосинхронизация и др.) синхронного насосного агрегата.

В данной работе представлена схема электрического торможения синхронного насосного агрегата с указанием его основного и вспомогательного оборудования, позволяющая оценить протекание переходных процессов в электрических цепях синхронного двигателя с учётом различных параметров релейной защиты и автоматики агрегатов насосной станции. Здесь же представлена методика определения параметров энергоёмкого резистора, в том числе нахождение оптимальной величины его сопротивления  $R_H$  для снижения угонной частоты вращения при переходе насосного агрегата в генераторный режим при аварийном отключении синхронного двигателя от сети, а также приведено математическое описание гидромеханических переходных процессов в проточном тракте НА при уgone.

### **Общие положения**

Известно, что энергоёмкий резистор – это электропроводный композиционный материал на основе технического углерода и цемента. Устройства электрического торможения с

применением таких резисторов используются на некоторых ГЭС России для обеспечения динамической устойчивости гидрогенераторов.

При определённых условиях схема электрического торможения гидрогенераторов может быть использована для торможения синхронных насосных агрегатов, устанавливаемых на магистральных каналах. На рисунке 1 представлена схема электрического торможения синхронного двигателя, оснащённого электромашинной системой возбуждения.

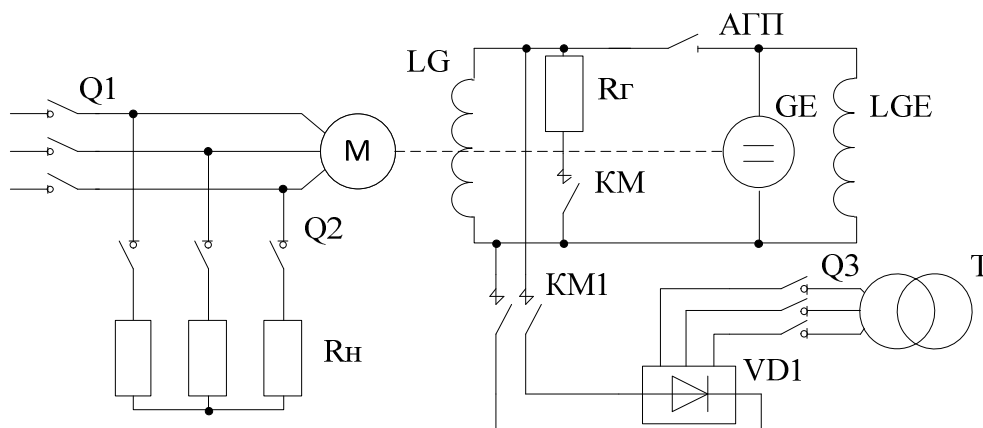


Рисунок 1. Схема электрического торможения

Порядок торможения насосного агрегата следующий. При отключении выключателя  $Q1$ , подающего питание на зажимы двигателя, одновременно или с некоторой выдержкой времени включаются выключатели  $Q2$ ,  $Q3$  и контактор  $KM1$ . Автомат гашения поля (АГП), контактор  $KM$  в цепи гасительного сопротивления  $RГ$  отключены. В этом случае обмотка статора закорачивается на резистор  $RН$  (энергоёмкое сопротивление), а обмотка возбуждения получает питание от независимого источника через разделительный трансформатор  $T$ , выпрямительное устройство  $VD1$ . При питании главного возбуждителя  $GE$  от независимого источника питания, подключённого к другой секции шин или к резервной линии, необходимость установки  $T$  и  $VD1$  исключается.

Сущность такого способа торможения заключается в том, что при подаче постоянного тока в обмотку возбуждения вращающегося ротора в обмотке статора протекает переменный ток. Вследствие взаимодействия токов статора и ротора создаётся тормозящий момент.

Задача использования описанного способа электрического торможения синхронного насосного агрегата, оборудованного тиристорной системой возбуждения, решается относительно просто.

#### Методика расчёта величины сопротивления энергоёмкого резистора

Система уравнений переходных процессов, записанных в форме Горева с учётом резистора  $RН$  в цепи статора двигателя, равенстве нулю производных потокосцеплений и

проекций напряжения  $U_{Id}$ ,  $U_{Iq}$  при питании обмотки возбуждения от независимого источника, имеет вид:

$$\begin{cases} (1+s)\Psi_q + rI_d = 0, \\ -(1+s)\Psi_d + rI_q = 0, \\ (1+s)I_f = E_q, \\ \Psi_d = x_d I_d + E_q, \\ \Psi_q = x_q I_q, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Psi_d$ ,  $\Psi_q$  – результирующие потокосцепления по продольной и поперечной осям машины;

$I_f$  – ток обмотки возбуждения;

$E_q$  – синхронная ЭДС машины;

$r = r_{ст} + R_H$  – суммарное активное сопротивление статорной цепи, включающее сопротивление обмотки статора  $r_{ст}$  и сопротивление добавочного резистора  $R_H$ ;

$I_d, I_q$  – составляющие тока статора двигателя по осям  $d$  и  $q$ ;

$s$  – скольжение.

Исключив из уравнений (1)  $\Psi_d$ ,  $\Psi_q, E_q$  и приняв выражение  $(1+s) = \omega$ , где  $\omega$  – скорость вращения агрегата, получим уравнения напряжения относительно токов:

$$\begin{cases} \omega x_q I_q + r I_d = 0, \\ \omega(x_d I_d + \omega I_f) - r I_q = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему (2) относительно токов, получим выражения для токов  $I_d$  и  $I_q$  в функции тока возбуждения и скорости:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{\omega^3 x_q}{\omega^2 x_d x_q + r^2} I_f, \\ I_q &= \frac{\omega^2 r}{\omega^2 x_d x_q + r^2} I_f. \end{aligned} \quad (3)$$

Полный ток статора определяется выражением

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \omega^2 I_f \sqrt{\frac{r^2 + \omega^2 x_q}{\omega^2 x_d x_q + r^2}}. \quad (4)$$

Тогда активная мощность, обусловленная потерями в статоре, определяется по формуле:

$$P_{\Sigma} = I^2 r = \frac{\omega^4 I_f^2 r (\omega^2 x_q + r^2)}{\omega^2 x_d x_q + r^2}. \quad (5)$$

Электромагнитный момент можно найти, как:

$$M_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{\omega} = \frac{\omega^3 I_f^2 r (\omega^2 x_q + r^2)}{\omega^2 x_d x_q + r^2}. \quad (6)$$

Однако последнее справедливо при  $\omega = \omega_0 = 1$ .

При  $x_d = x_q = x$  выражения для определения тормозящих электромагнитной мощности и момента значительно упрощаются и имеют вид:

$$P_{\text{Э}} = \frac{\omega^4 r}{\omega^2 x^2 + r^2} I_f^2, \quad (7)$$

$$M_{\text{Э}} = \frac{\omega^3 r}{\omega^2 x^2 + r^2} I_f^2. \quad (8)$$

Оптимальная величина сопротивления  $r_{\text{опт}}$ , при которой создаётся максимальная тормозящая мощность, определяется из условия  $dP_{\text{Э}}/dr=0$  и составит

$$r_{\text{опт}} = \omega x. \quad (9)$$

Для электромагнитного момента величина этого сопротивления определяется по выражению (9).

Таким образом, выражения (3)-(9) позволяют проанализировать зависимости токов статора, электромагнитной мощности для гашения энергии при аварийном выбеге синхронного двигателя при различных частотах вращения агрегата и различных токах возбуждения и определить величины сопротивлений резистора, включенного в цепь закороченного статора, при котором обеспечиваются тормозящие мощность и момент.

### **Математическое описание момента сопротивления (торможения) при аварийном останове насосного агрегата с учётом гидромеханических переходных процессов в его проточном тракте**

Движение насосного агрегата описывается известным дифференциальным уравнением относительного движения ротора двигателя вида

$$T_{J_{\text{Э}}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{Э}} - M_{\text{Т}}, \quad (10)$$

где  $M_{\text{Э}}$  – электромагнитный момент двигателя, обусловленный потерями в статорной цепи, включающей и потери в энергоёмком резисторе;

$M_{\text{Т}}$  – момент, равный моменту торможения (сопротивления) и гидравлическому моменту взаимодействия рабочего колеса насоса с потоком воды в напорном тракте насосного агрегата;

$T_{J_{\text{Э}}}$  – эквивалентная постоянная инерции.

Анализ экспериментальных данных и результатов расчётов показывает, что эквивалентная постоянная инерции  $T_{J_{\text{Э}}}$  приближённо может быть определена соотношением

$$T_{J_{\text{Э}}} = T_{J_{\text{Д}}} + T_{J_{\text{Н}}} + T_{J_{\text{В}}}, \quad (11)$$

где  $T_{J_{\text{Д}}}$  – постоянная инерции двигателя;

$T_{J_{\text{Н}}}$  – постоянная инерции насоса;

$T_{J_{\text{В}}}$  – постоянная инерции водовода.

Постоянная инерции двигателя может быть определена по формуле

$$T_{JД} = \frac{GD^2 \omega_0^2}{365P_H}, \quad (12)$$

где  $GD^2$  – маховый момент двигателя, т·м<sup>2</sup>;

$\omega_0$  – синхронная скорость двигателя, об/мин;

$P_H$  – номинальная активная мощность двигателя, кВт.

Постоянная инерции насоса составляет

$$T_{JН} = (0,4 \div 0,3)T_{JД}. \quad (13)$$

Постоянная инерции водовода определяется по формуле

$$T_{JВ} = \frac{Q \sum_i l_i / F_i}{gH}, \quad (14)$$

где  $Q$  – расход насоса, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – напор, м;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$l_i$  и  $F_i$  – соответственно длина и сечение  $i$ -го участка водовода.

Величина  $M_T$ , входящая в (10), включает момент, обусловленный динамической нагрузкой при уgone насосного агрегата при потере двигателем питания, и гидравлический момент, возникающий в результате взаимодействия насоса с потоком воды в трубопроводе. Точное моделирование этих моментов является достаточно сложной задачей, поскольку их изменение определяется гидромеханическими переходными процессами в проточном тракте агрегата. Однако для гидромеханических переходных процессов, сопровождающихся одновременным опорожнением напорного водовода, упрощённо можно принять следующий закон моделирования момента  $M_T$  [2] (рисунок 2). В момент отключения насосного агрегата от сети вследствие инерционности вращающихся масс момент  $M_T$  на валу агрегата сохраняет предшествующее значение. Затем из-за отрицательного гидроудара в напорном тракте и изменения направления потока воды в напорном трубопроводе момент на валу агрегата уменьшается практически до нулевого значения в момент времени  $T_Q$ . Через время, приблизительно равное  $2T_Q$ , из-за положительного гидроудара в напорном тракте момент  $M_T$  увеличивается приблизительно до начального значения. Далее идёт вновь уменьшение момента, причём сначала более интенсивное, а затем менее интенсивное до момента времени  $T_{ОП}$  опорожнения напорного трубопровода.

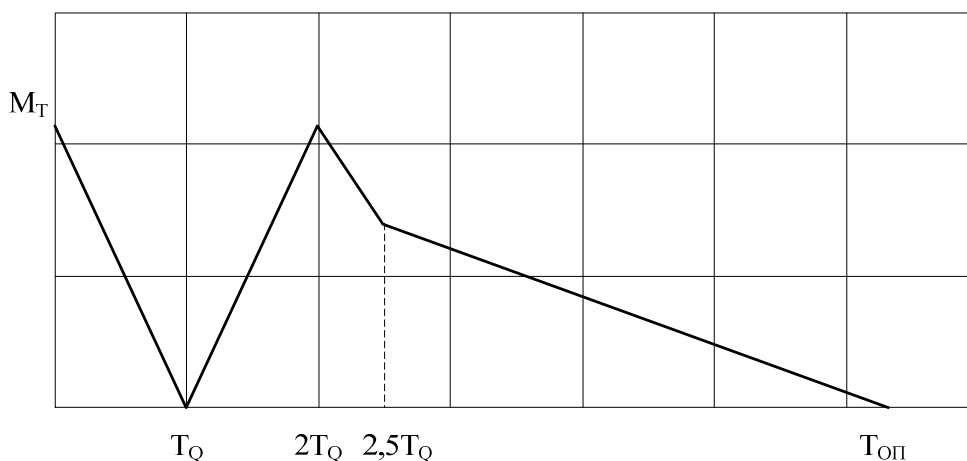


Рисунок 2. Изменение  $M_T$  в функции времени

Таким образом, для принятого закона изменения момента  $M_T$  следует знать его начальное значение  $M_{T0}$  и величины времени  $T_Q$  и  $T_{оп}$ . Время  $T_Q$  определяется как

$$T_Q \cong 1,8 \sqrt[3]{(T_{JD} + T_{JH})T_{JB}^2}. \quad (15)$$

Время опорожнения напорного трубопровода  $T_{оп}$  может быть ориентировочно определено по объёму воды  $V$  в этом трубопроводе и расходу  $Q$  насосного агрегата, т.е.

$$T_{оп} \cong \frac{V}{Q}. \quad (16)$$

На всех характерных участках рисунка 2 использована линейная зависимость изменения во времени  $M_T$  и представлена следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_T = M_{T0} \left(1 - \frac{t}{T_Q}\right) \text{ при } 0 \leq t < T_Q, \\ M_T = M_{T0} \frac{t - T_Q}{T_Q} \text{ при } T_Q \leq t < 2T_Q, \\ M_T = M_{T0} \left(1 - \frac{t - 2T_Q}{T_Q}\right) \text{ при } 2T_Q \leq t < 2,5T_Q, \\ M_T = M_{T0} \left(1 - \frac{t - 2,5T_Q}{T_{оп} - 2,5T_Q}\right) \text{ при } 2,5T_Q \leq t < T_{оп}. \end{array} \right. \quad (17)$$

Величина  $M_{T0}$  в (17) может быть принята равной коэффициенту загрузки синхронного двигателя. Объём воды  $V$  в напорном трубопроводе определяется геометрическими размерами наклонной части трубопровода, расход  $Q$  находится по паспортным данным насосной станции. При расчёте (17) величина  $T_Q$  может быть принята равной 4 с.

Используя уравнения переходных процессов, включающие математические выражения, представленные в [1] и приведённые в настоящей статье математическое описание переходных гидромеханических процессов и методику определения величины сопротивления  $R_H$  энергоёмкого резистора были выполнены аналитические расчёты процессов при электрическом торможении по программе для ЦВМ.

Результаты расчётов дали хорошее совпадение с результатами натуральных испытаний, представленных в [3].

### **Выводы**

1. Предложена принципиальная схема основного и вспомогательного оборудования для реализации процессов при электрическом торможении синхронных насосных агрегатов при их аварийном отключении от сети.
2. Представлена методика определения величины сопротивления энергоёмкого резистора. Метод позволяет определить оптимальную величину сопротивления из условия снижения угонной скорости вращения НА при аварийном его отключении.
2. Предложено моделирование момента сопротивления при выбеге с учётом гидромеханических переходных процессов в проточном тракте насосного агрегата.

### **Список литературы**

1. Аршеневский Н.Н., Поспелов Б.Б. Переходные процессы крупных насосных станций. М.: Энергия, 1980. – 111 с.
2. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев; Отв. ред. М.Л.Левинштейн, Л. А. Суханов; Акад. наук СССР. Науч. совет по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электроэнергетики», ЛПИ им. М.И. Калинина. – 2-е изд., доп. – Л.:Наука, 1985. – 502 с.
3. Костин В.Н., Овчинников В.В., Чесноков И.П., Мисриханов М.Ш. Натурные испытания электрического торможения насосных агрегатов при потере электроснабжения// Повышение эффективности работы энергосистем: Тр.ИГЭУ. Вып.4 / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. Иван.гос.энерг. ун-т – Иваново, 2001. – с.147-151.
4. Овчинников В.В., Чесноков И.П., Новиков А.В., Петрухин А.Н. Математическое моделирование электрического торможения мощных насосных агрегатов при их аварийном останове // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014, №1.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. / Под ред. Мамиконянца Л.Г. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.:Энергоатомиздат, 1984. – 240с.

### **Рецензенты:**

Хорошавин В.С., д.т.н, профессор кафедры «ЭПиАПУ», ФГБОУ ВПО «ВятГУ», г. Киров;  
Черепанов В.В., д.т.н, профессор кафедры «ЭПА», ФГБОУ ВПО «ВятГУ», г. Киров.