

**Авторы:**

д.т.н. Бульчев А.В.,  
ООО «НПП Бреслер»,  
г. Чебоксары, Россия,  
Грибков М.А.,  
ПАО «Россети  
Московский регион»,  
г. Москва, Россия.

D.Sc. Bulichev A.V.,  
«NPP Bresler» LLC,  
Cheboksary, Russia,  
Gribkov M.A.,  
PJSC «Rosseti Moscow  
Region»,  
Moscow, Russia.

# АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ПОЗИЦИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

## ANALYSIS OF SELF-STARTING PROCESSES OF ELECTRIC MOTORS IN MODERN ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS FROM THE PERSPECTIVE OF RELAY PROTECTION

Аннотация: рассмотрены процессы самозапуска в распределительных электрических сетях. Показано, что во многих схемно-режимных ситуациях высока вероятность остановки роторов электродвигателей в процессе выбега. Наиболее тяжелым вариантом самозапуска электродвигателей при этом можно считать пуск из неподвижного состояния ротора при минимальном остаточном напряжении на зажимах электродвигателей. Установлено, что этот режим следует принимать в качестве расчетного при выборе параметров срабатывания релейной защиты. При наличии в распределительной сети крупных электродвигателей высокого напряжения, участвующих в самозапуске, необходимо выполнять расчет самозапуска с учетом конкретных параметров агрегатов электродвигатель-механизм и электрической системы.

Ключевые слова: релейная защита, самозапуск, распределительные сети, коэффициент самозапуска.

**Abstract:** the processes of self-starting in electrical distribution networks are considered. It is shown that in many circuit-mode situations, the probability of stopping the rotors of electric motors during the run-out is high. The most difficult option for self-starting electric motors in this case can be considered starting from the stationary state of the rotor with minimal residual voltage at the terminals of electric motors. It is established that this mode should be taken as the calculated one when selecting the parameters of the relay protection operation. If

**Введение**

Внимание к предельным возможностям электрических систем слабеет. Люди настолько привыкли к электрической энергии, что интуитивно начинают считать ее почти неограниченным природным ресурсом. Но, к сожалению, в электроснабжении существуют ограничения, с которыми необходимо считаться.

Стремление обеспечить все больше технологических процессов непрерывным электроснабжением привело к тому, что массовую электродвигательную нагрузку на ступени напряжения 0,4 кВ преимущественно подключают к питающей сети через коммутационные аппараты с фиксированным положением «включено». К тому же реализовать такое подключение сегодня оказывается очень легко с помощью разнообразных автоматических выключателей. Специальное отключение электродвигателей (ЭД) при снижении напряжения питания (защита от понижения напряжения)

предусматривают лишь в отдельных случаях, применительно к ЭД высокого напряжения 6-10 кВ.

По этой причине в электрических системах все больше ЭД остаются подключенными к питающей сети с фиксацией положения выключателя при потере и последующем восстановлении питания. В этих условиях неизбежно возрастают нагрузки на электрическую систему при восстановлении питания. Переходные процессы становятся все более интенсивными и сопровождаются чрезмерно большими токами.

Максимальные токи и другие параметры, характеризующие эти процессы, в современных электрических системах стали существенно отличаться от тех, которые были рекомендованы нормативными и другими документами прошлых лет для выбора параметров срабатывания релейной защиты и автоматики (РЗА). В этой связи задачи оценки предельных параметров процессов при самозапуске ЭД, применительно к со-

временным условиям, представляются актуальными, а их решения позволят повысить точность и достоверность действий РЗА [1].

### Общие задачи самозапуска

Самозапуском принято называть восстановление нормальной работы ЭД без вмешательства персонала после кратковременного перерыва электроснабжения или глубокого провала напряжения. Если нарушение питания быстро ликвидировано действием РЗА, то при успешном самозапуске это событие не является аварией. Ущерб, практически, не возникает. Если самозапуск не успешен, то роторы ЭД останавливаются, и ущерб может быть значительным, особенно при расстройстве сложного технологического процесса.

Во всех случаях осуществление самозапуска должно быть обоснованным. Его следует применять только для тех механизмов, для которых он действительно необходим и разрешен. Главная задача самозапуска - сохранить работоспособность технологического процесса при кратковременном нарушении электроснабжения.

Успешный самозапуск ЭД позволяет удерживать в работе технологическое оборудование при коротких замыканиях (КЗ) в сети, при автоматическом включении резервного питания (АВР) и при действии автоматического повторного включения (АПВ), а также позволяет ускорить восстановление технологических процессов, нарушенных вследствие снижения качества электроэнергии. В некоторых случаях обеспечивает безопасный останов оборудования, задействованного в сложных технологических процессах.

Перечень ЭД ответственных механизмов, которые должны участвовать в самозапуске, определяют по условиям обеспечения нормальной работы технологического оборудования при нарушении электроснабжения с учетом возможностей системы электроснабжения обеспечить успешный самозапуск. Решение об этом, как правило, принимает главный инженер предприятия-потребителя электрической энергии.

В ряде случаев, когда самозапуск необходим по технологическим причинам, но возможности системы электроснабжения не достаточны для одновременного самозапуска, предусматривают несколько сту-

пеней самозапуска, т.е. поочередный самозапуск нескольких групп двигателей.

Нужно учитывать еще и то, что нередко восстановление питания после его аварийного прекращения происходит в условиях сниженной суммарной мощности источника питания (например, при аварийном отключении одного из двух вводов питающей подстанции и автоматическом переводе всей ее нагрузки на другой ввод). Неоправданное увеличение суммарной мощности ЭД, участвующих в самозапуске, может в этих условиях привести к неуспешному самозапуску и, соответственно, к развитию аварийной ситуации.

Процесс самозапуска содержит два явно выраженных этапа.

Первый - выбег ЭД, по сути, это затормаживание при исчезновении или провале напряжения питания. Параметры процесса выбега, в основном, определяется механическими характеристиками агрегатов электродвигатель-механизм.

Второй - разгон и восстановление нормального режима. Разгон происходит при сниженном напряжении питания, значение которого зависит от параметров сети, характеристик ЭД и другой присоединенной электрической нагрузки.

Характер процесса самозапуска определяется следующими важнейшими режимными особенностями:

- в выбеге и разгоне одновременно участвуют, как правило, несколько (группа) ЭД;
- в момент начала восстановления питания роторы ЭД могут, как продолжать вращаться, так и находиться в неподвижном состоянии (причем, возможны различные комбинации ЭД с вращающимися и неподвижными роторами);
- самозапуск ЭД происходит под нагрузкой.

Во время выбега эквивалентное электрическое сопротивление ЭД уменьшается. Чем дольше продолжается провал напряжения или пауза без напряжения питания, тем ближе эквивалентное сопротивление ЭД к его пусковому сопротивлению, а ток самозапуска – к пусковому току.

### Свойства ЭД

Основными и наиболее многочисленными участниками процессов самозапуска являются асинхронные ЭД. Они во многом определяют параметры этих процессов.

there are large high-voltage electric motors involved in self-starting in the distribution network, it is necessary to calculate self-starting taking into account the specific parameters of the electric motor-mechanism units and the electrical system.

**Keywords:** relay protection, self-start, distribution networks, self-start coefficient.



**Булычев**

**Александр Витальевич**

В 1980 г. окончил Вологодский политехнический институт по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», инженер-электрик. В 1998 г. окончил докторантуру и защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование защит блоков генератор-трансформатор и электродвигателей». Директор по науке ООО «НПП Бреслер», профессор.



**Грибов**  
**Максим Александрович**  
 В 2005 г. окончил Московский энергетический институт (ТУ) по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».  
 Директор департамента релейной защиты и режимной автоматики электрических сетей ПАО «Россети Московский регион».

Физические процессы в асинхронном ЭД схожи с процессами, происходящими в трансформаторе. Поэтому по аналогии с трансформаторами для анализа режимов асинхронных машин используют схемы замещения.

Если при неподвижном роторе правомерность представления асинхронного двигателя схемой замещения очевидна, то при вращающемся роторе это требует обоснования.

Так, при вращающемся роторе, кроме изменения электродвижущей силы (ЭДС) обмотки ротора  $E_2$ , в зависимости от скольжения (частоты тока в обмотке ротора) изменяется и индуктивное сопротивление рассеянной обмотки ротора (рис. 1):

$$x_2 = sx_{2k}.$$

Здесь  $x_{2k}$  и  $x_2$  - индуктивные сопротивления рассеяния обмотки ротора при неподвижном и вращающемся роторе, соответственно.

С учетом этого, используя приведенные к обмотке статора величины, для цепи ротора можно записать следующее уравнение:

$$s\dot{E}'_{2k} + j\dot{I}'_2 sx'_{2k} + j\dot{I}'_2 R'_2 = 0.$$

Разделив это уравнение на  $s$  и решив его относительно  $\dot{I}'_2$ , получим:

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_{2k}}{R'_2/s + jx'_{2k}}.$$

Это уравнение цепи, в которой к источнику ЭДС  $\dot{E}'_{2k}$  подключено комплексное сопротивление

$$R'_2/s + jx'_{2k}.$$

Как видно, только активная составляющая этого сопротивления зависит от скольжения.

В результате приведения  $\dot{E}'_{2k}$  к цепям статора получим следующее равенство:

$$\begin{aligned} \dot{E}'_{2k} &= k_E \dot{E}'_{2k} = \left( \frac{w_1 k_{\sigma\delta 1}}{w_2 k_{\sigma\delta 2}} \right) 4,44 f_1 w_2 k_{\sigma\delta 2} \dot{\Phi} = \\ &= 4,44 k_{\sigma\delta 1} f_1 w_1 \dot{\Phi} = \dot{E}'_1 = \dot{E}. \end{aligned}$$

Таким образом, имея равные ЭДС ротора и статора с одной частотой, можно представить их цепи в виде единой схемы замещения (рис. 2) [2].

На схеме замещения обозначены:  $R_0$  и  $x_0$  - эквивалентное сопротивление потерь в стали и индуктивное сопротивление намагничивания;  $R_1$  и  $x_1$  - активное сопротивление и индуктивное сопротивление

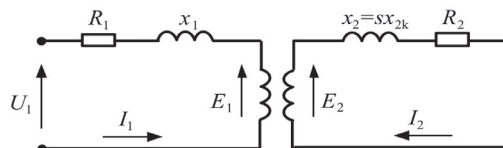


Рис. 1. Схема физической трансформаторной связи цепей статора и ротора асинхронной машины

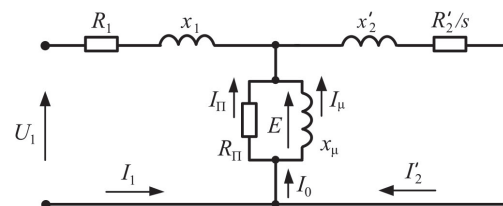


Рис. 2. Т-образная схема замещения асинхронной машины

рассеяния обмотки статора;  $I_0$  - ток намагничивания;  $I_\mu$  и  $I_R$  - индуктивная и активная составляющие тока намагничивания;  $U_1$  - фазное напряжение питания.

Для практических задач более удобно пользоваться Г-образной схемой замещения, в которой ветвь намагничивания вынесена на зажимы источника питания (рис. 3). Для расчетов, где допустимо отклонение параметров схемы в пределах 5%, их можно принять равными параметрам исходной Т-образной схемы замещения. Если необходима более высокая точность, то параметры должны определяться с учетом поправочных коэффициентов [2].

Преобразование энергии в асинхронных ЭД неизбежно сопровождается потерями: электрическими, магнитными, механическими и добавочными.

Активная мощность  $P_1$ , подводимая к трехфазному асинхронному ЭД из питающей сети, частично расходуется на покрытие магнитных потерь в стали и электрических потерь в обмотке статора

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi.$$

Активная мощность, которая передается со статора на ротор, определяется в соответствии со схемой замещения

$$P_3 = 3(I'_2)^2 R'_2/s.$$

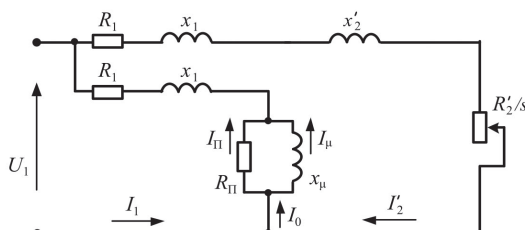


Рис. 3. Г-образная схема замещения асинхронного ЭД

Эта мощность поступает на ротор через магнитное поле, что и определило ее название – электромагнитная мощность.

Часть электромагнитной энергии расходуется в обмотке ротора в виде электрических потерь, а оставшаяся часть преобразуется в полную механическую мощность.

Полезная механическая мощность на валу двигателя  $P_2$  меньше полной механической мощности на величину механических и добавочных потерь.

Отношение полезной механической мощности на валу к потребляемой активной электрической мощности – есть коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Разность между этими двумя мощностями равна суммарным потерям:

$$P_{\Pi} = P_1 - P_2$$

Следует подчеркнуть, что на заводской табличке двигателя указываются номинальные значения полезной мощности на валу ( $P_{\text{н}}=P_2$ ), линейного напряжения питания ( $U_{\text{н}}$ ), КПД ( $\eta_{\text{н}}$ ) и коэффициента мощности ( $\cos\varphi_{\text{н}}$ ).

Например, если на табличке указаны  $P_{\text{н}} = 15$  кВт,  $U_{\text{н}} = 380$  В,  $\cos\varphi_{\text{н}} = 0,8$ ,  $\eta_{\text{н}} = 0,75$ , то двигатель потребляет из сети в номинальном режиме активную мощность

$$P_1 = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} = \frac{15}{0,75} = 20 \text{ кВт}.$$

Важное практическое значение для анализа процессов самозапуска имеет зависимость вращающего момента асинхронного ЭД от скольжения.

Электромагнитный вращающий момент  $M$ , развиваемый асинхронным двигателем, связан с электромагнитной мощностью соотношением [2]:

$$M = \frac{P_{\text{э}}}{\omega_1} = 3(I_2')^2 \frac{R_2'}{s\omega_1}$$

Следует отметить, что вращающий момент асинхронного ЭД пропорционален активной мощности, которая выделяется в активном сопротивлении обмотки ротора.

Используя схему замещения, эту связь можно выразить через параметры статора и ротора:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_1 s \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}$$

Прежде всего, необходимо отметить, что вращающий момент ЭД зависит от трех групп величин: первая – величины, определяемые конструкцией ЭД ( $R_1$ ,  $R_2'$ ,  $x_1$ ,  $x_2'$ ); вторая – величины, характеризующие источник

питания (уровень напряжения и частота); третья – величины, связанные с механической нагрузкой (момент сопротивления, скольжение или скорость вращения ротора).

На рис. 4 показана естественная механическая характеристика асинхронного ЭД при неизменных напряжении и частоте источника питания.

Важное значение для оценки рабочих свойств асинхронной машины в режиме двигателя ( $0 < s < 1$ ) имеют особые точки механической характеристики, соответствующие пусковому моменту  $M_{\Pi}$ , максимальному  $M_{\text{М}}$  и номинальному вращающему моменту  $M_{\text{н}}$ .

Во время пуска двигателя в ход, пока ротор неподвижен, скольжение равно 1, поэтому ЭДС и ток обмотки ротора максимальны. Соответственно ток обмотки статора превышает номинальный ток двигателя в несколько раз. Двигатель развивает сравнительно небольшой вращающий момент, который и принято называть пусковым. Несоответствие между пусковым током и пусковым моментом связано с преобладанием индуктивной составляющей в сопротивлении обмотки ротора в период пуска, а вращающий момент, как уже отмечалось, пропорционален активному сопротивлению этой обмотки.

Пусковой момент двигателя определяется следующим образом:

$$M_{\Pi} = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_1 \left[ (R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}$$

Для того, чтобы двигатель развернулся под нагрузкой, его пусковой момент должен быть больше момента сопротивления рабочего механизма. Под действием пускового момента ротор двигателя начинает вращаться, скольжение уменьшается, а вращающий момент увеличивается.

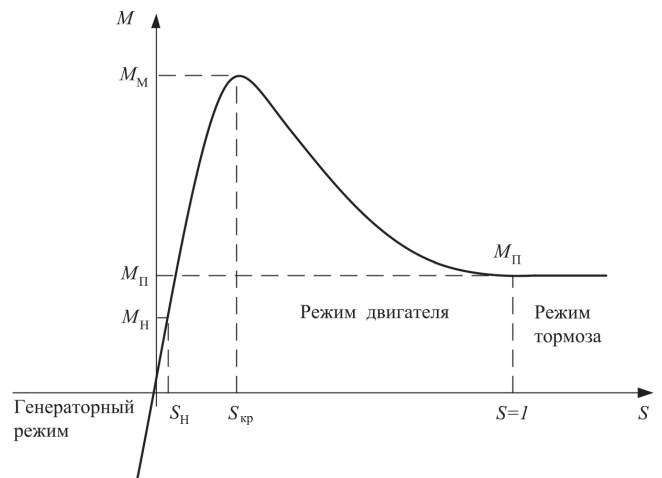


Рис. 4. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

При некотором значении скольжения  $s_{кр}$ , называемом критическим, вращающий момент двигателя достигает максимального значения  $M_M$ .

Взяв производную от электромагнитного вращающего момента по скольжению и приравняв ее нулю, можно получить уравнение относительно скольжения. Решение этого уравнения дает значение скольжения, при котором вращающий момент имеет максимальное значение:

$$s = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_2'^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

Здесь знак плюс соответствует двигательному, а минус – генераторному режимам работы машины.

Используя это значение скольжения, можно определить максимальный вращающий момент двигателя:

$$M_M = \frac{3U_1^2}{2\omega_1 \left[ R_1 + \sqrt{R_1'^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}$$

Для ЭД мощностью более 1 кВт практически всегда  $R_1 \ll (x_1 + x_2')$ , и можно принять  $R_1 = 0$ . Тогда формулы для критического скольжения и максимального вращающего момента упрощаются:

$$s \approx \pm \frac{R_2'}{x_1 + x_2'}; \quad M_M \approx \frac{3U_1^2}{2\omega_1 (x_1 + x_2')}$$

Отношение текущего значения вращающего момента к максимальному позволяет получить упрощенное широко используемое выражение для механической характеристики двигателя в относительных единицах:

$$\frac{M}{M_M} = \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

Это соотношение дает возможность построить механическую характеристику по каталожным данным.

Номинальный вращающий момент двигателя соответствует номинальному скольжению, значение которого обычно находится в диапазоне от 0,01 до 0,1, причем меньшие значения относятся к крупным, а большие – к мелким двигателям.

Вращающий момент определяется следующим образом:

$$M_M = \frac{P_{2H}}{\omega_H} = \frac{60P_{2H}}{2\pi n_H} = 9,55 \frac{P_{2H}}{n_H} \text{ (Н/м)},$$

где  $P_{2H}$  – номинальная полезная механическая мощность на валу, Вт;

$\omega_H = 2\pi n_H/60$  – номинальная угловая скорость вращения ротора, 1/с;

$n_H$  – номинальная частота вращения ротора, об/мин.

При работе двигателя с малыми скольжениями от 0 до  $s_{кр}$ , к которым относится и номинальное, увеличение скольжения под действием тормозного момента вызы-

вает увеличение вращающего момента двигателя. Благодаря этому обеспечивается устойчивая работа двигателя при изменении механической нагрузки.

При скольжении больше  $s_{кр}$  работа двигателя неустойчива, т.к. на этом участке характеристики увеличение скольжения сопровождается уменьшением вращающего момента.

Механические характеристики асинхронных двигателей могут быть весьма разнообразными, но обычно соблюдаются определенные соотношения между основными параметрами. Для обеспечения успешного пуска двигателя, необходимо иметь  $M_{п}/M_H > 1$ , а для нормальной работы под нагрузкой, как правило, выдерживается соотношение  $M_M/M_H = 1,8-2,5$  [3].

В режиме холостого хода ротор двигателя вращается, не выполняя полезной работы, с частотой, близкой к синхронной. При этом скольжение и ток ротора, практически, равны нулю. Учитывая это, в соответствии со схемой замещения ток статора и его фаза определяется так:

$$I_X = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_{CT})^2 + (x_1 + x_\mu)^2}};$$

$$\varphi_x = \arccos \frac{R_1 + R_{CT}}{\sqrt{(R_1 + R_{CT})^2 + (x_1 + x_\mu)^2}};$$

$$\text{где } R_{CT} = \frac{1/R_0}{\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_0}\right)^2}; \quad x_\mu = \frac{1/x_0}{\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_0}\right)^2}.$$

При наличии полезной нагрузки двигателя частота вращения ротора снижается и увеличивается скольжение. Это вызывает повышение тока ротора и, соответственно, тока статора, который равен сумме двух токов:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'$$

Здесь  $I_0$  – ток намагничивания, который равен току холостого хода и не изменяется по амплитуде и фазе при изменении частоты вращения ротора;  $I_2'$  – ток ротора, приведенный к обмотке статора:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}};$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_1 + \frac{R_2'}{s}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

Ток статора и коэффициент мощности, соответствующие номинальному режиму работы двигателя, приводятся в паспорте двигателя.

Если номинальный ток статора не известен, то его можно определить следующим образом:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{\text{н}}\eta_{\text{н}}\cos\varphi_{\text{н}}},$$

где  $U_{\text{н}}$  – номинальное линейное напряжение питания;  $\eta_{\text{н}}$  и  $\cos\varphi_{\text{н}}$  – КПД и коэффициент мощности, соответствующие номинальному режиму работы двигателя.

### Параметры, характеризующие пуск ЭД

Наибольший рабочий ток возникает в обмотке статора при пуске двигателя, когда ротор неподвижен и скольжение равно 1:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{нп}} &= \dot{I}_0 + \dot{I}'_{2\text{п}}; \\ I_{2\text{п}} &= \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \end{aligned}$$

Соответствующий этому режиму коэффициент мощности:

$$\cos\varphi_{\text{п}} = \frac{R_1 + R_2'}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Для процесса пуска асинхронного ЭД характерно изменение фазы пускового тока. По мере разгона двигателя уменьшается скольжение и увеличивается активная составляющая сопротивления ротора  $R_2'/s$ . В результате этого повышается коэффициент мощности и снижается уровень тока статора [3]. На рис. 5 показано изменение тока статора в процессе пуска асинхронного ЭД под нагрузкой. В случае пуска ЭД в ход под нагрузкой в начале процесса коэффициент мощности составляет 0,4–0,5. В завершающей стадии он приближается к номинальному значению 0,8–0,85. Если же ЭД пускается без нагрузки, то после некоторого повышения в завершающей стадии пуска, коэффициент мощности снижается до уровня, определяемого режимом холостого хода.

Следует отметить, что диапазон изменения тока статора в нормальных рабочих режимах достаточно велик. Так, в режиме холостого хода ток статора обычно составляет 20–40% номинального тока статора, а пусковой ток превышает номинальный в 3–7 раз.

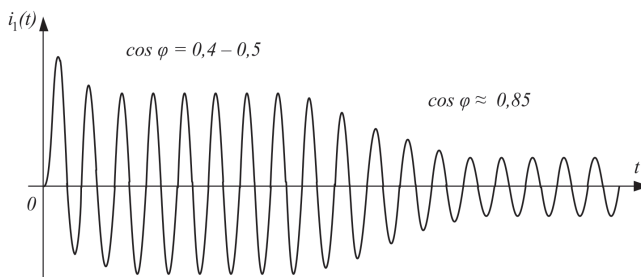


Рис. 5. Процесс изменения тока статора и коэффициента мощности при пуске асинхронного ЭД

Время разгона двигателя (это, время протекания пускового тока по обмотке) зависит, как от собственных параметров двигателя, так и от характеристик приводимого механизма. Наиболее быстро, за время в пределах 10 с, разгоняются насосы. Механизмы с большими маховыми массами (дымососы, дробилки и др.) могут иметь время разгона несколько десятков секунд.

Ток статора двигателя при пуске соизмерим по уровню с током КЗ.

Пуск асинхронного ЭД в физическом смысле представляет собой процесс разгона некоторой вращающейся массы из состояния покоя до установившейся скорости вращения при противодействии момента сопротивления. Этот процесс описывается уравнением движения [4]:

$$M_{\text{вз}} = M - M_c - J \frac{d\omega}{dt}.$$

где  $M$  – вращающий момент ЭД;

$M_c$  – момент сопротивления;

$M_{\text{вз}}$  – избыточный (динамический) момент;

$J = GD^2/4$  – суммарный момент инерции агрегата двигатель-механизм, приведенный к валу двигателя.

Это уравнение целесообразно представить в относительных единицах:

$$m_{\text{вз}} = -\tau_J \frac{ds}{dt}.$$

Здесь  $m_{\text{вз}} = \frac{M_{\text{вз}}}{M_{\text{н}}}$ ;  $\tau_J = \frac{GD^2\omega_0}{4M_{\text{н}}}$  – механическая постоянная времени агрегата;

$M_{\text{н}}$  – номинальный вращающий момент двигателя;

$\omega$  и  $\omega_0$  – текущая и синхронная угловая скорости.

Время, соответствующее изменению скольжения от  $s_1$  до  $s_2$ , находится путем интегрирования уравнения движения

$$t = -\tau_J \int_{s_1}^{s_2} ds / m_{\text{вз}}.$$

Если допустить, что избыточный момент есть постоянная величина, равная номинальному моменту двигателя, то время разгона двигателя до синхронной (номинальной) скорости будет равно механической постоянной времени:

$$t_{\text{пном}} = -\tau_J \int_1^0 ds = +\tau_J.$$

Эту величину иногда называют номинальным временем пуска, и она дает наглядное представление о физическом смысле механической постоянной времени.

Так, механическая постоянная времени – это величина, равная времени разгона двигателя от неподвижного состояния до синхронной скорости под действием постоянного избыточного момента, равного номинальному моменту двигателя.

Для того, чтобы определить реальное время пуска двигателя, необходимо иметь механические характе-

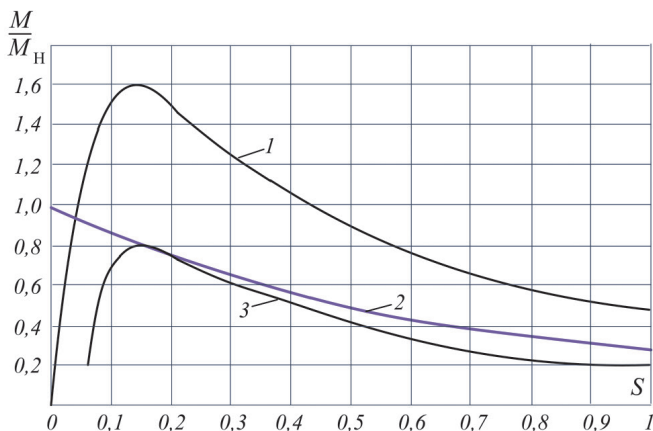


Рис. 6. Механические характеристики

ристики двигателя и приводимого механизма. Описание этих характеристик в виде аналитических зависимостей очень громоздко, а часто и невозможно. Наиболее распространено графическое представление механических характеристик (рис. 6), что используется при практических расчетах для РЗА, где допустимы погрешности до 10%.

Во-первых, строят механическую характеристику двигателя (кривая 1) и механизма (кривая 2) в относительных единицах. За базисную величину принимают номинальный момент двигателя и все механические параметры приводят к валу двигателя. Путем графического вычитания строят кривую избыточного момента 3.

Во-вторых, область, ограниченная кривой избыточного момента и осью абсцисс, разбивают на ряд прямоугольников с основанием  $\Delta s_i$  и высотой  $\Delta m_{из}$ .

В-третьих, вычисляют время пуска двигателя:

$$t = -\tau_J \sum_{i=1}^{i=n} \Delta s_i / \Delta m_{из}.$$

Пусть (в качестве конкретного численного примера) необходимо определить время пуска ЭД воздушной со следующими параметрами:  $P_H = 500$  кВт;  $n_0 = 750$  об/мин; маховые массы двигателя и воздушной, соответственно:  $GD_{ЭД}^2 = 42$  кг·м;  $GD_B^2 = 1200$  кг·м. В соответствии с графиками (рис. 6) можно записать следующие численные значения:

$$t_{п} = \tau_J \left[ \frac{0,1}{0,2} + \frac{0,1}{0,22} + \frac{0,1}{0,26} + \frac{0,1}{0,32} + \frac{0,1}{0,38} + \frac{0,1}{0,43} + \frac{0,1}{0,57} + \frac{0,1}{0,72} + \frac{0,05}{0,8} + \frac{0,05}{0,75} + \frac{0,05}{0,3} \right] = 2,76\tau_J$$

$$t_J = \frac{(GD_{ЭД}^2 + GD_B^2)\omega_0}{4M_H} = \frac{(GD_{ЭД}^2)n_0}{364P_H} = \frac{(42 + 1200)750^2}{364 \cdot 500 \cdot 10^3} = 3,8 \text{ с.}$$

Таким образом, расчетное время пуска составляет  $t_{п} = 2,76 \cdot 3,8 = 10,6$  с.

### Параметры процессов самозапуска ЭД

Процессы разгона ЭД при самозапусках, по сути, являются частными случаями процессов пуска. ЭД с механизмами не всегда успевают затормозиться до полной остановки за время провала напряжения или потери питания, и после восстановления питания начинают разгон с ненулевой скорости вращения. В общем, отличие заключается в начальных условиях, которые определяются схемами питания двигательной нагрузки и режимами:

1. При потере питания одной секции распределительного устройства (РУ) и последующем срабатывании АВР длительность перерыва питания определяется временем срабатывания АВР и собственным временем срабатывания выключателей Q1-Q3 (рис. 7). Этот вариант самозапуска характерен для систем собственных нужд электростанций [5] и насосных станций с крупными ЭД. Специальные быстродействующие АВР могут подключать нагрузки к резервному источнику питания за 30-40 мс (с учетом действия выключателей). В обычных распределительных сетях время срабатывания АВР согласовывается с временем срабатывания защит смежных присоединений и устройств АПВ в питающей сети. При этом длительность перерыва питания может достигать 20-30 с. В этих условиях высока вероятность остановки роторов ЭД при выбеге.

2. При отключении питающей линии и последующем успешном АПВ (рис. 8). Длительность перерыва питания определяется временем срабатывания АПВ и собственным временем срабатывания выключателя на головном участке линии  $Q_{W1}$  или  $Q_{W2}$ . Минимальное время перерыва питания в цикле АПВ в распределительных сетях по условиям готовности приводов выключателей линий и успешности АПВ, как правило, составляет 1-1,5 с. Большая часть роторов мелких ЭД, участвующих в самозапуске, за этот интервал времени останавливаются, и при восстановлении питания происходит пуск из неподвижного состояния. Процесс самозапуска каждого

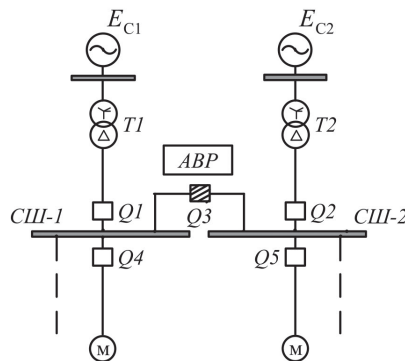


Рис. 7. Фрагмент схемы питания ЭД в сети с АВР

крупного ЭД своеобразен, и его необходимо рассматривать с учетом индивидуальных параметров ЭД, механизмов и питающих электрических сетей.

3. При возникновении КЗ в точке К на линии W2 (рис. 9), которое затем отключается релейной защитой (РЗ), возникает провал напряжения на шине Ш-2. Его длительность определяется временем срабатывания РЗ и выключателя Q<sub>W2</sub>, отключающего линию W2, а глубина – видом и местом КЗ. В зависимости от параметров провала напряжения формируются начальные условия для разгона ЭД, получающих питание от шины Ш-2. В этих условиях длительность провала напряжения на шине Ш-2 может быть значительной, и достигать нескольких секунд (определяющим параметром является время срабатывания защиты поврежденной линии W2). При этом к моменту восстановления напряжения роторы ЭД могут быть неподвижными, и предельным наиболее тяжелым вариантом самозапуска может быть совместный пуск всех участвующих в самозапуске ЭД. Режим часто становится еще более тяжелым из-за наличия неотключаемой статической нагрузки и значительного провала напряжения на шине Ш-2.

Таким образом, в трех перечисленных схемно-режимных ситуациях вполне возможна остановка ЭД при потере питания или глубоком провале напряжения питания. Следовательно, предельным случаем разгона в процессе самозапуска можно считать групповой пуск ЭД из неподвижного состояния ротора (или, как частный случай, пуск одного ЭД).

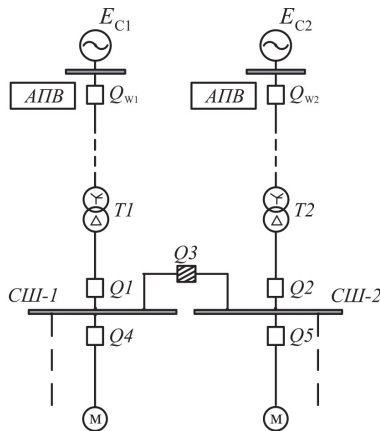


Рис. 8. Фрагмент схемы питания ЭД в сети с АПВ

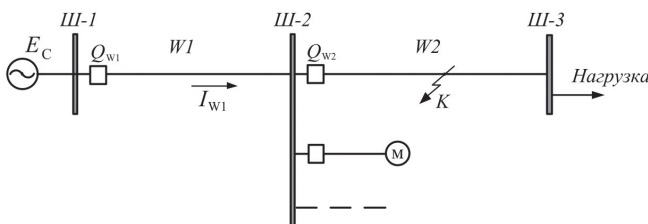


Рис. 9. Фрагмент схемы питания ЭД в сети при близком КЗ

### Напряжение при самозапуске

Вращающий момент, развиваемый ЭД в процессе разгона, пропорционален квадрату напряжения. Для того, чтобы при восстановлении питающего напряжения электромагнитный момент ЭД был больше момента сопротивления механизма, остаточное напряжение на зажимах ЭД должно быть больше определенного предельного уровня. Допустив, что номинальный момент сопротивления механизма составляет 0,8-0,85 пускового момента, можно определить предельное остаточное напряжение на зажимах ЭД в относительных единицах при котором возможен его пуск:

$$U'_{\text{ЭДПР}} = \sqrt{0,85/1} = 0,7.$$

В связи с этим принято считать, что самозапуск окажется успешным, если напряжение питания ЭД в процессе разгона не ниже 0,7 номинального.

Напряжение на зажимах ЭД, участвующих в самозапуске, определяется в соответствии со схемой замещения (рис. 10):

$$U_{\text{ЭД}} = I_{\text{П}} x_{\text{ЭД}} = E_C x_{\text{ЭД}} / (x_{\text{ЭД}} + x_{\text{ВН}}),$$

где  $x_{\text{ЭД}}$  и  $x_{\text{ВН}}$  – эквивалентное сопротивление ЭД и сопротивление внешних цепей питания ЭД, соответственно;  $I_{\text{П}}$  – пусковой ток ЭД;

$E_C$  – ЭДС питающей системы (обычно принимают применительно к стороне высокого напряжения понижающего трансформатора, где допустимо считать напряжение независимым от нагрузки).

Расчетное эквивалентное сопротивление ЭД можно вычислить с учетом общепринятых допущений по номинальным параметрам ЭД:

$$x_{\text{ЭД}} = U_{\text{Н}}^2 / S_{\text{П}}.$$

Здесь  $U_{\text{Н}}$  – номинальное напряжение ЭД;  $S_{\text{П}}$  – пусковая полная мощность ЭД, участвующего в самозапуске:

$$S_{\text{П}} = k_{\text{П}} P_{\text{Н}} / (\cos \varphi_{\text{Н}} \eta_{\text{Н}}),$$

где  $\cos \varphi_{\text{Н}}$  и  $\eta_{\text{Н}}$  – номинальный коэффициент мощности и КПД, соответственно;

$k_{\text{П}}$  – кратность пускового тока ЭД.

При групповом самозапуске эквивалентное сопротивление группы ЭД определяют по эквивалентной

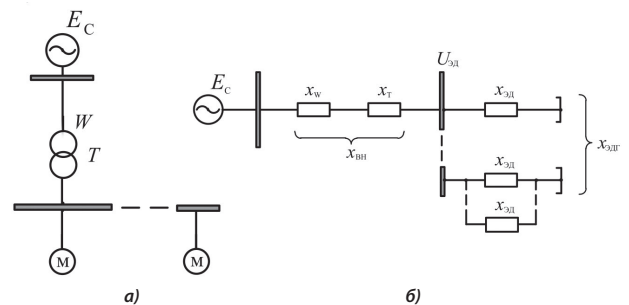


Рис. 10. Фрагмент схемы питания ЭД: (а) при самозапуске и соответствующая схема замещения (б)

суммарной полной мощности всех ЭД, участвующих в самозапуске:

$$x_{ЭДГ} = U_N^2 / S_{ПГ},$$

где  $S_{ПГ}$  - суммарная полная мощность всех ЭД, участвующих в самозапуске.

### Оценка успешности самозапуска

Успешность процесса самозапуска удобно оценивать по графической механической характеристике (рис. 11) [6]. В нормальном режиме (рабочая точка 1) ЭД работает со скольжением  $s_0$ ; вращающий и тормозной моменты равны и ротор ЭД с механизмом вращается с постоянной скоростью. При потере питания ЭД (полагая, что в наиболее тяжелом случае самозапуска напряжение на зажимах ЭД падает до нуля) вращающий момент ЭД «мгновенно», т.е. без изменения скольжения, уменьшается до нуля (рабочая точка 2). Так как тормозной момент становится больше вращающего, то ротор двигателя с приводным механизмом тормозится (процесс выбега). Скольжение растет от  $s_0$  до  $s_{B1}$ .

Затем после перерыва происходит восстановление питания. Если восстановление питания произойдет в точке 3, так что скольжение, достигнутое за время выбега  $s_{B1}$ , будет меньше предельного скольжения  $s_{ПР}$ , то рабочая точка «мгновенно» переместится из точки 3 в точку 4. При этом вращающий момент  $M_3$  больше момента сопротивления  $M_C$ :  $M_3(s_{B1}) > M_C(s_{B1})$ , и ротор двигателя с приводным механизмом ускорятся; идет процесс разгона. Скольжение уменьшается, и ЭД возвращается в нормальный режим в точку 1 со скольжением  $s_0$  (или близко к ней, так как напряжение питания может быть снижено). Таким образом реализуется успешный самозапуск.

Если восстановление питания произойдет в точке 5, в состоянии, когда скольжение, достигнутое за время выбега  $s_{B2}$ , будет больше предельного скольжения  $s_{ПР}$ ,

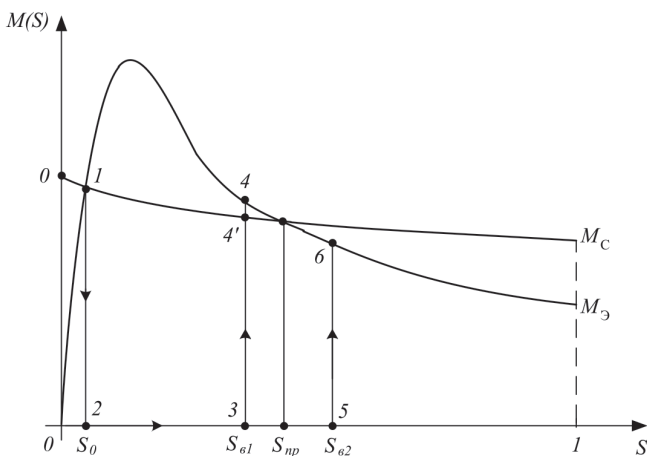


Рис. 11. Графическое отображение идеализированного процесса самозапуска

то рабочая точка «мгновенно» переместится из точки 5 в точку 6. При этом, как и при выбега, тормозной момент  $M_C$  больше вращающего  $M_3$ :  $M_C(s_{B2}) > M_3(s_{B2})$ , и двигатель с приводным механизмом продолжают тормозиться до полной остановки. Таким образом самозапуск становится неуспешным и ротор ЭД прекращает вращаться.

В общем виде процессы самозапуска возбужденных синхронных (СД) и асинхронных электродвигателей по характеру протекания переходных процессов близки.

Практически самозапуск возбужденного СД при сохранении динамической устойчивости будет обеспечен, если за время нарушения нормального электроснабжения (к моменту его восстановления) угол, характеризующий положение ротора относительно оси вращающегося магнитного поля, не превысит критического значения 130-150°. Время, за которое этот угол достигает величины критического значения при авариях в системах электроснабжения, в среднем составляет 0,2-0,3 с.

### Выводы

1. В распределительных сетях во многих схемно-режимных ситуациях высока вероятность остановки роторов ЭД в процессе выбега. Наиболее тяжелым вариантом самозапуска ЭД при этом можно считать пуск ЭД из неподвижного состояния ротора при минимальном остаточном напряжении на зажимах ЭД. Этот режим следует принимать в качестве расчетного при выборе параметров срабатывания РЗ.

2. При наличии в распределительной сети крупных ЭД высокого напряжения, участвующих в самозапуске, необходимо выполнять расчет самозапуска с учетом конкретных параметров агрегатов ЭД-механизм и электрической системы.

3. Коэффициент самозапуска мелко моторной нагрузки, участвующей в самозапуске на ступени напряжения 0,4 кВ, с учетом увеличения в ней мощности ЭД и более тяжелых условий самозапуска, можно принимать равным 1,5-1,7.

### Литература:

1. Бульчев А.В., Силанов Д.Н. Двухуровневая цифровая система релейной защиты с резервированием в распределительных сетях // Релейная защита и автоматизация. – 2020. - №4 (41). - С. 8-13.
2. Важнов А.И. Электрические машины. - Л.: Энергия, 1969. - 768 с.
3. Бульчев А.В., Ванин В.К., Меркурьев Г.В. Методы и технические средства контроля параметров и защиты электродвигателей переменного тока. - СПб.: РАО «ЕЭС России» ГВЦ Энергетики Северо-Западный филиал, 1996. - 96 с.
4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных электродвигателей. - М.Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 528 с.
5. Курбангалиев У.К. Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций. - М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. - 64 с.
6. Бульчев А.В., Ларионова Е.Г. Электромеханические процессы в электрических системах: примеры и задачи с решениями. - Чебоксары: ИПК РЗА, 2019. - 132 с.