

О. Н. Шпаков, к. т. н., технический эксперт НПАА

О РАСЧЕТЕ НАГРУЗОК В ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ АРМАТУРЕ

Вопросу расчетов нагрузок в арматуре при управлении электроприводами придается большое значение. Особенно актуальной эта проблема стала после аварии на АЭС в США в 1980 году, причиной которой была поломка клапана от воздействия динамических перегрузок при закрывании его электроприводом. После этого события были выполнены расчеты и произведена массовая замена электроприводной арматуры на всех АЭС США и Европы. Предприятиям, занимающимся разработкой программ и устройств систем диагностики арматуры в процессе эксплуатации, также потребовались расчеты нагрузок при работе электроприводов.



Олег Николаевич Шпаков

Страны, строящие атомные станции, (например, Швеция, Китай и др.), разработали технические требования к арматуре и электроприводам, включающие не выдвигаемые ранее положения [1, 2]:

- необходимость обеспечения запаса по крутящему моменту до 50 % по отношению к номинальному;
- обеспечение работоспособности арматуры при несрабатывании путевых и моментных выключателей.

В России при проектировании арматуры для АЭС должно учитываться требование о сохранении плотности арматуры по отношению к внешней среде при отказе отключающих устройств в приводе [3].

Проанализируем, как отражаются на конструкциях эти требования на примере червячных и планетарных приводов с асинхронными электродвигателями.

Для определения нагрузок в системе арматура – электропривод используется уравнение динамики

$$I \ddot{\varphi} + \frac{1}{v \omega_{om}} \dot{\varphi} + c \varphi - \frac{1}{v} = 0, \quad (1)$$

где I – момент инерции системы, приведенный к валу двигателя; φ – угол поворота вала двигателя; c – жесткость системы, приведенная к валу двигателя;

$\frac{1}{v} = \frac{2M_k}{s_k}$ – коэффициент крутизны механической характеристики двигателя;

ω_{om} – частота вращения ротора при отключении электродвигателя;

M_k – крутящий момент двигателя, соответствующий критическому скольжению

$$s_k = s_n (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 + 1});$$

$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}$ – номинальное скольжение;

$\lambda = \frac{M_k}{M_{ном}}$ – отношение момента, соответствующего критическому скольжению, к номинальному;

ω_0 – синхронная скорость вращения двигателя (угловая скорость идеального холостого хода);

ω_n – скорость вращения двигателя при номинальной мощности.

Уравнение (1) решается при начальных условиях:

$$t = 0, \quad \varphi = \frac{M_n}{c},$$

$$\dot{\varphi} = \omega_0 (1 - v M_n),$$

(здесь M_n – момент, на который настроен привод). При решении учитывается время t_{om} , характеризующее запаздывание отключения двигателя от сети вследствие инерционности схемы управления.

Полученные в результате решения значения угла поворота

$$\varphi_{om} = \frac{M_{om}}{c}$$

и частоты вращения при отключении двигателя $\dot{\varphi} = \omega_{om}$ используют в качестве начальных условий для решения уравнений движения системы при отключенном двигателе:

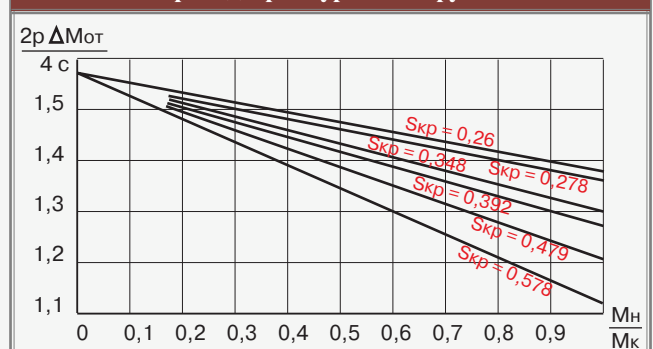
$$I \ddot{\varphi} + c \varphi = 0. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) были решены для арматуры со всеми выпускаемыми Тульским заводом «Электропривод» приводами. Расчеты производились со значениями приведенной жесткости 0,05; 0,1; 0,5; 1,0 и 2,5 Нм/рад, времени запаздывания отключения 0,01; 0,02; 0,03 и 0,04 с, отношением крутящего момента настройки к критическому моменту электродвигателя от 0,29 до 0,984, приведенного момента инерции – от 0,0006 до 0,043 Нм·с² и крутизны механической характеристики электродвигателей от 100 до 7000.

В результате обработки большого массива данных, полученных по результатам расчетов, построен график влияния параметров системы на нагрузки (Рис. 1).

Поскольку прямые критических скольжений расположены под определенными углами к осям, по

Рис. 1. Влияние параметров системы привод-арматура на нагрузки



данным рис. 1 получены формулы для проведения инженерных расчетов динамических нагрузок в электроприводной арматуре в явном виде [4].

Величина превышения крутящего момента за время запаздывания отключения двигателя

$\Delta M_{om} = M_{om} - M_n$ определяется по выражению:

$$\Delta M_{om} = \frac{305}{2p} \left(2,05 - \frac{M_n}{M_k} S_k \right) c t_{om}^{1+0,4cv}, \quad (3)$$

где $2p$ – число пар полюсов.

Крутящий момент отключения $M_{om} = M_n + \Delta M_{om}$.

Максимальный крутящий момент вычисляют по формуле

$$M_m = \sqrt{\left(\frac{M_{om}}{c} \right)^2 + \frac{I \omega_{om}^2}{c}}. \quad (4)$$

Частота вращения при отключении двигателя рассчитывается по выражению

$$\omega_{om} = \omega_o (1 - v M_{om}).$$

Крутящий момент на выходном валу электропривода $M_a = M_{ог} i \eta$.

Таким образом, нагрузки в электроприводной арматуре зависят от:

- жесткости системы;
- момента инерции подвижных деталей;
- времени запаздывания отработки команды на отключение электродвигателя после подачи сигнала;
- уровня настройки предохранительного устройства (муфты ограничения крутящего момента);
- параметров электродвигателя;
- конструктивных особенностей электропривода.

Жесткость системы оказывает существенное влияние на перегрузки. Самыми значащими параметрами, влияющими на общую жесткость системы, являются жесткость пружины муфты ограничения крутящего момента и крутильная жесткость арматуры. Крутильная жесткость определяется величиной приращения крутящего момента при повороте подвижного элемента резьбовой пары арматуры на определенный угол. Она определена экспериментально, с использованием специально разработанного датчика крутящего момента [5], и ее значения составили:

- клапаны с плоским запирающим элементом и задвижки на $PN \geq 6,3$ МПа – $180 \div 350$ Нм/рад;
- клапаны с коническим запирающим элементом – $250 \div 540$ Нм/рад;
- задвижки на $PN < 6,3$ МПа – $45 \div 98$ Нм/рад;
- задвижки $DN \geq 250$ – $90 \div 120$ Нм/рад.

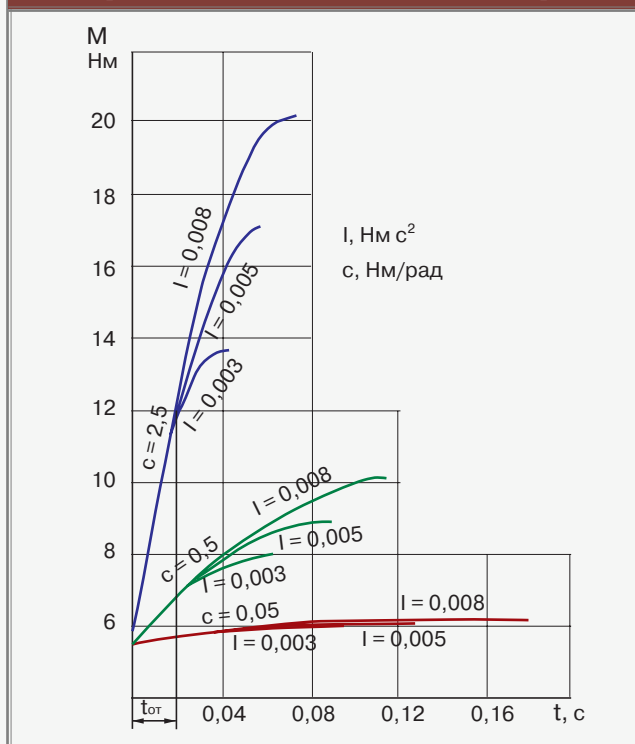
Для расчетов жесткость системы приводится к валу электродвигателя. Приведенная жесткость системы учитывает жесткость деталей, валов и передач с учетом КПД, а также крутильной жесткости арматуры. Например, требуется определить приведенную жесткость системы арматура – электропривод с червячным редуктором и подвижным подпружиненным червяком. Расчет выполняется по формуле:

$$c = \frac{1}{i^2 \eta \left(\frac{1}{c_a} + \frac{1 - f i g \alpha}{R^2 c_n} \right)},$$

где i – передаточное отношение редуктора привода, η – КПД, c_a – крутильная жесткость арматуры, f – коэффициент трения в червячной паре, $tg \alpha$ – тангенс угла наклона зубьев червячной пары, c_n – линейная жесткость пружины предохранительного устройства, R – радиус начальной окружности червячного колеса.

Зависимость нагрузки системы от приведенной жесткости и момента инерции представлена на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость нагрузок системы от приведенной жесткости и момента инерции



На графике видно, что до отключения электродвигателя момент инерции не оказывает влияния на уровень нагрузки, но существенно повышает его в период инерционного выбега. Жесткость же влияет на нагрузки даже во время запаздывания отключения двигателя. Это же подтверждает формула (3).

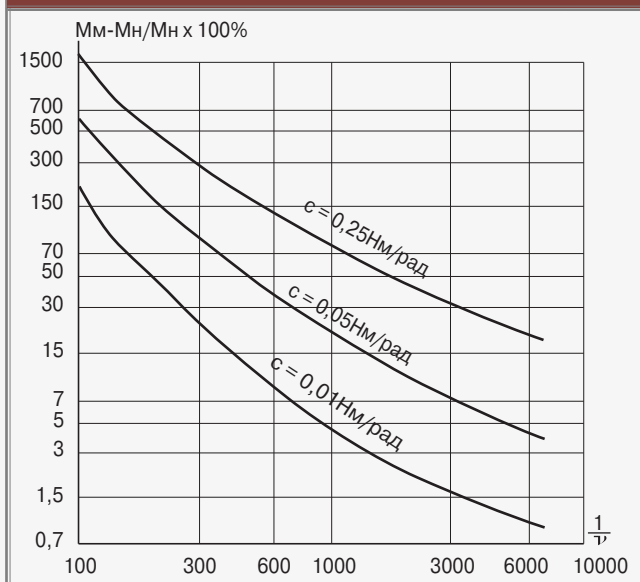
Время запаздывания отработки команды на отключение электродвигателя от момента подачи сигнала на его отключение (например, размыкания контактов микровыключателя) оказывает влияние на величину нагрузки. Уровень настройки предохранительного устройства также существенно влияет на нагрузки.

К параметрам электродвигателей относятся: число пар полюсов, определяющее частоту вращения, мощность и угол наклона кривой крутящего момента в функции времени, характеризующийся критическим скольжением. Расчеты и эксперименты показали, что асинхронные электродвигатели с двумя парами полюсов, в особенности малой мощности, сильнее нагружают арматуру за счет увеличенного момента инерции против двигателей с четырьмя парами полюсов. Меньшие перегрузки дают электродвигатели с повышенным скольжением (мягкой механической характеристикой) – см. рис. 3.

О конструктивных особенностей электропривода будет сказано в выводах и рекомендациях.

Рассмотрим данные о нагрузках в системах, определенных экспериментально и подтвержденных расчетом.

Рис. 3. Зависимость нагрузок от крутизны механической характеристики двигателя



Данные измерений и расчетов приведены на диаграмме (Рис. 4).

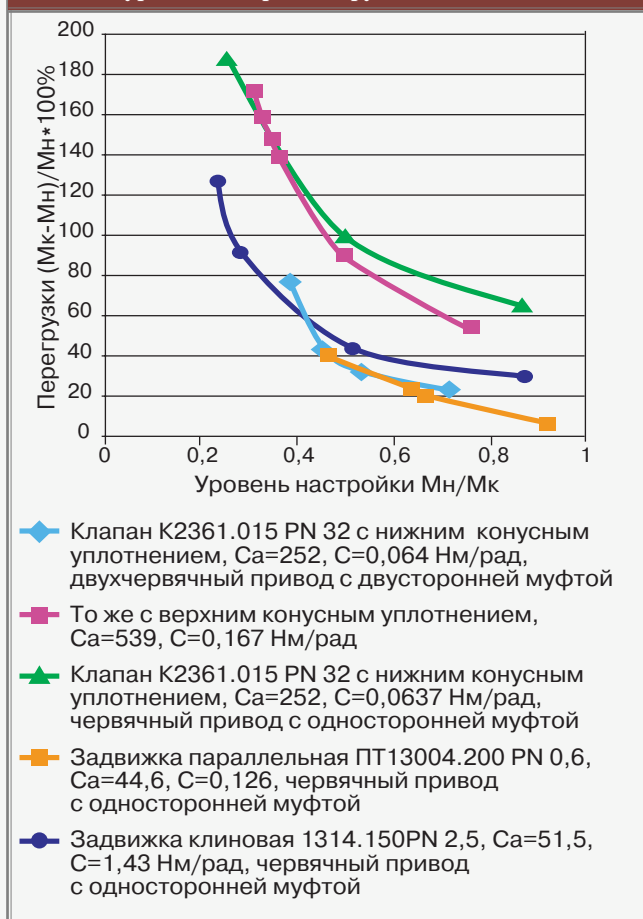
Результаты анализа нагрузок в реальной электроприводной арматуре позволяют сделать вывод о том, что чем меньше отношение номинального момента к критическому, тем больше величина перегрузок, как в запорных клапанах, так и в задвижках. Поэтому настройка электропривода на крутящий момент меньший номинального в надежде на то, что электропривод обеспечит необходимые усилия за счет инерционного выбега, на самом деле приводит к значительным перегрузкам.

Требование проектантов систем АЭС об установке на арматуру электроприводов с 50-ти процентным запасом по крутящему моменту, возможно, потребует переработки большинства конструкций как отечественных, так и зарубежных электроприводов. По-видимому, придется усилить и конструкции арматуры. Так поступила фирма «Семпелл», создав необычно сложную задвижку [1], которая, однако, выдержала большие нагрузки. «Задвижка и привод выбраны таким образом, чтобы при отказе выключателей не вызывалось никаких недопустимых напряжений... Достижимая мощность привода на 50% больше, чем теоретически требуется». В публикации, к сожалению, не приводятся результаты эксплуатации.

В любом случае должны быть сделаны проверочные расчеты.

Не всегда при перегрузках арматура разрушается. Все-таки конструкторы закладывают в расчеты большие запасы прочности, зная о том, что, во-первых, отливки изготовят не всегда высокого качества, во-вторых, арматуру деформируют при монтаже, учитываются и другие обстоятельства. Тем не менее, перегрузки оказывают отрицательное влияние на работоспособность и надежность арматуры. Экспериментально были проверены результаты наработки на отказ по критерию потери герметичности клапанов из ковкого чугуна PN 40 с плоским уплотнением металл по металлу E21009.050. Три партии клапанов с электроприводами 87A008 были отрегулированы с использованием датчика крутящего момента на 50 (требующийся по технической документации), 80 и 120 Нм. Их подвергли наработке с

Рис. 4. Зависимость нагрузок от уровня настройки крутящего момента



проверкой герметичности через каждые 100 циклов. Результаты проверки приведены в таблице.

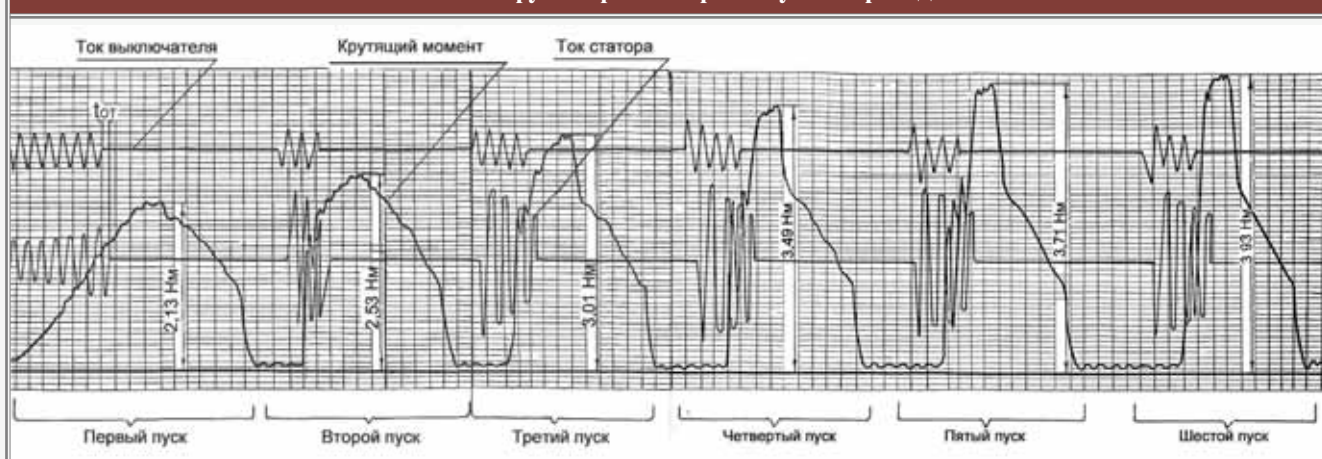
Номер клапана	Максимальный крутящий момент, Нм	Наработка до потери герметичности	Средняя наработка
1	50	5100	4800
2		4300	
3		5000	
3	80	2800	3267
4		3900	
5		3100	
6	120	2700	2733
7		2300	
8		3200	

Таким образом, эксплуатационные качества клапанов при перегрузках существенно снизились. Уменьшается и вероятность безотказной работы:

Степень превышения крутящего момента	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Вероятность безотказной работы при Nг = 3000 циклов	0,9993	0,9969	0,9854	0,9722	0,9525	0,9236
Вероятность безотказной работы при Nг = 3300 циклов	0,9861	0,9564	0,8508	0,8340	0,7389	0,6554

Теперь рассмотрим, чем опасна ситуация при несрабатывании путевых и моментных выключателей. Это может привести к несанкционированным

Рис. 5. Нагрузки при повторных пусках приводов



повторным пускам приводов. В некоторых конструкциях электроприводов команда на отключение не фиксируется. Такие приводы изготавливали заводы до перехода на производство унифицированного ряда электроприводов. В них пружина муфты ограничения крутящего момента распрямлялась после сжатия и перемещала червяк, несмотря на то, что передача была самотормозящейся. Вибрации трубопроводов превращали червячную пару в не самотормозящуюся. Червяк освобождал кулачок, воздействующий на микровыключатель, в результате чего электродвигатель включался для повторного пуска. Арматура при этом чаще всего повреждалась. При повторных пусках процесс закрытия происходит при существенном увеличении жесткости системы и возрастании нагрузок. Приведенная жесткость системы определяется, исходя из условия, что до достижения значения крутящего момента, равного максимальному в предыдущем цикле, выходной вал электропривода неподвижен, т.е. $c_a = \infty$. При превышении значения максимального крутящего момента выходной вал начинает вращаться, а приведенная жесткость системы принимает исходное значение.

Процесс наглядно иллюстрирует осциллограмма (Рис. 5). На ней видно, что при втором пуске крутящий момент превышает значения, полученные при первом пуске на 18,7 %; при третьем – на 41,3 %; при четвертом – на 63,8 %; при пятом – на 74,2 %; при шестом – на 84,5 %. Конечно, при таких перегрузках нельзя ожидать надежной работы арматуры.

При проектировании или модернизации арматуры и электроприводов целесообразно учесть следующие рекомендации:

1. Усилить конструкции арматуры, поскольку им придется выдерживать нагрузки, существенно выше штатных. В любом случае должны быть сделаны проверочные расчеты.

2. При выборе асинхронных электродвигателей для электроприводов следует отдавать предпочтение двигателям с четырьмя парами полюсов и повышенным скольжением. Целесообразно применение шаговых или бесконтактных электродвигателей, управляемых как цифровым, так и аналоговым сигналом. Подобные двигатели разрабатываются и изготавливаются, например, Санкт-Петербургским ЗАО «Проектно-производственно-технологическая фирма «ЭЛМА-Ко» и применяются в электроприводах для перевода стрелок железнодорожных путей.

3. Электропривод должен максимально «гасить»

кинетическую энергию движущихся масс. Из этого требования следует, в частности, чтобы пружина предохранительного устройства не сжималась до соприкосновения витков.

4. Следует учитывать влияние повторных включений двигателя при возможности возникновения неисправности выключателей. В штатных условиях конструкции электроприводов должны обеспечивать постоянство сохранения сигнала на отключение после срабатывания предохранительного устройства даже при исправных выключателях. Это требование выполняется в электроприводах унифицированного ряда и практически всеми изготовителями отечественных и зарубежных приводов, однако, требование к сохранению работоспособности арматуры при несрабатывании выключателей делает необходимой дополнительную проверку истинного крутящего момента, возникающего при повторных пусках двигателей.

5. В последнее время выявлены факты повреждения арматуры при настройке и проверке герметичности от ручного дублера электропривода. Из этого следует, что ручной дублер не должен создавать крутящий момент более того, на который рассчитан электропривод, а конструкция арматуры должна быть работоспособной при воздействии полного крутящего момента, развиваемого электроприводом, выбранного с учетом 50-процентного запаса по крутящему моменту от номинального. Такой расчет необходимо выполнить также и для того, чтобы обеспечить сохранение эксплуатационных характеристик арматуры при несрабатывании путевых и моментных выключателей.

Литература:

1. У. Курцхофер, Дж. Пик Задвижки для систем безопасности АЭС/Арматуростроение 2004, № 5, с. 58.
2. Отраслевой стандарт машиностроения КНР JB/T 8528 – 97.
3. ОТТ – 87 «Арматура для оборудования и трубопроводов АС». М.: ГУП НИЦ ВНИИАС, 1987.
4. О.Н. Шпаков Аналитический метод определения динамических нагрузок в электроприводной арматуре/Химическое и нефтяное машиностроение, № 8, 1973.
5. О.Н. Шпаков, А.Д. Плотников, В.А. Соловьев, Т.О. Тер-Матеосянц, В.И. Зимацкий А.с. № 323677. Устройство для измерения крутящих моментов и усилий/Бюллетень изобретений №1, 1972.