

УДК 621.313

**Р. Р. Моисеева, Н. Г. Баженов, Р. Х. Самигуллина,
Ю. Н. Зацаринная**

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ключевые слова: переходные процессы, волновые переходные процессы, заряд входной емкости, перенапряжения, начальное распределение напряжения, частотные электромагнитные колебания.

В данной статье рассматриваются переходные процессы, происходящие в электрических машинах постоянного тока. При анализе этих процессов делается вывод о том, что скорость этого процесса велика и ток в цепи якоря при пуске превышает номинальный в несколько раз, что может привести к соответствующему нагреву обмотки якоря.

Keywords: transients, wave transients, charge of entrance capacity, overstrain, initial distribution of tension, frequency electromagnetic fluctuations.

In this article the transients happening in electric cars of a direct current are considered. In the analysis of these processes the conclusion that the speed of this process of a bike and current in an anchor chain at start-up exceeds nominal several times that can lead to the corresponding heating of a winding of an anchor is drawn.

Общие сведения о переходных процессах. Процесс перехода электрической машиной от одного установившегося режима к другому происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени. Данные процессы, происходящие в электрической машине в течение этого времени, называют переходными процессами. Физическая сущность переходных процессов основывается на каскадообразном изменении энергии магнитного и электрического полей реактивных элементов цепи, в которой произошла коммутация. Этот факт определяет собой два основополагающих закона переходных процессов – законы коммутации.

Первый закон коммутации – ток через любую индуктивность непосредственно до коммутации равен току через ту же индуктивность непосредственно после коммутации $I_L(0_+)$, т.е.: $I_L(0_-) = I_L(0_+)$, или другими словами – напряжение на индуктивности может изменяться скачком, но при этом такого же изменения тока не будет.

Второй закон коммутации – напряжение на емкости непосредственно до коммутации $U_C(0_-)$ равно напряжению на емкости непосредственно коммутации $U_C(0_+)$, т.е. $U_C(0_-) = U_C(0_+)$ или другими словами – ток через емкость может изменяться скачком, но при этом скачкообразного изменения напряжения в ней не произойдет. Переходные процессы происходят при включении генераторов, при изменении их нагрузок, при коротких замыканиях, при сбросе нагрузки, при изменении скорости вращения двигателя, приводящего во вращение генераторов, при пуске двигателей, их торможении и реверсировании, при изменении нагрузок двигателей и т.д.

Различают волновые, электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы. На самом деле все они происходят и зависят друг от друга. Поэтому исследование реального переходного процесса очень сложно. Для упрощения рассуждений

эти четыре вида переходных процессов рассматриваются отдельно.

Волновые переходные процессы. В работающих электрических сетях возникают кратковременные импульсы напряжений, значения которых могут во много раз превышать нормальные рабочие напряжения, называются перенапряжениями.

Перенапряжения могут быть вызваны различными причинами:

- коммутационными операциями;
- замыканиями на землю, через электрическую дугу;
- грозowymi разрядами в линиях электропередачи.

Наиболее опасными являются атмосферные перенапряжения, вызываемые грозowymi разрядами. Амплитуды атмосферных перенапряжений достигают миллионов вольт.

Перенапряжения имеют характер кратковременных аperiодических или периодических импульсов или волн. Возникающие на каком – либо участке сети волны перенапряжения распространяются по воздушным линиям электропередачи со скоростью, близкой к скорости света. Для защиты электрических сетей от перенапряжений устанавливают разрядники, существенным моментом которых являются искровые промежутки. Одни полюсы искровых промежутков соединены с линией, а другие – с землей. При перенапряжении искровой промежуток пробивается, и электрический заряд волны перенапряжения переводится на землю. Однако волна перенапряжения при этом полностью не исчезает, так как размер искрового промежутка необходимо выбрать настолько большим, чтобы после отвода заряда волны перенапряжения на землю на искровом промежутке не возникла электрическая дуга под действием нормального

рабочего напряжения сети. Возникновению этой дуги способствует ионизация искрового промежутка под действием разряда волны перенапряжения. Поэтому разрядники обеспечивают снижение амплитуд волн перенапряжений до значений, которые все же в несколько раз превышают нормальное рабочее напряжение. Такие волны перенапряжений также достигают установленных электродвигателей.

Характерная форма волны перенапряжения имеет вид аperiодического импульса

Начальный, быстро или круто поднимающийся участок называется фронтом волны, а спадающий участок – хвостом волны. Длительность действия волны обычно составляют десятки микросекунд, а длительность фронта волны – несколько микросекунд или даже доли микросекунды. Таким образом, волну перенапряжения можно рассматривать как первичную полуволну некоторого периодического напряжения, имеющего весьма большую частоту $f = 10\ 000 \dots 50\ 000$ Гц. При приближенном анализе волну с крутым фронтом можно заменить прямоугольной волной.

Схема замещения обмоток электродвигателя при перенапряжениях. Между отдельными витками и катушками обмоток, а также между ними и заземленными частями электродвигателя существуют определенные емкости, которые шунтируют названные элементы обмоток. Соответствующие им емкостные сопротивления $X_C = \frac{1}{\omega C}$ при рабочей частоте $f = 50$ Гц

весьма велики и не оказывают какого-либо заметного влияния на работу электродвигателя. Поэтому ранее, при рассмотрении нормальных и аварийных процессов, протекающих с нормальной частотой, эти емкости во внимание не принимались. Однако при действии волн перенапряжений, которые движутся и изменяются с большой скоростью или большой частотой, влияние этих емкостей имеет первостепенное значение.

Схема замещения обмотки электродвигателя при перенапряжениях, учитывающая все виды связи (кондуктивная, индуктивная, емкостная), между отдельными элементами обмоток и между ними и землей, является чрезвычайно сложной. Поэтому ограничимся рассмотрением упрощенной схемы замещения обмотки электродвигателя при волновых процессах, которая позволит выяснить основные характерные особенности возникающих явлений.

Заряд входной емкости. При подходе волны перенапряжения происходят следующие процессы: при подходе волны перенапряжения к зажимам электродвигателя напряжение на обмотках вследствие большой крутизны фронта волны очень быстро возрастает. Скорость этого процесса настолько велика, что ток, создаваемый электрическим зарядом волны, из-за большой индуктивности обмотки сначала проходит не по виткам обмотки, а по ее емкостной цепи. Поэтому в момент подхода волны обмотка электродвигателя в целом действует как некоторая емкость $C_{лх}$, называемая входной емкостью.

Процесс заряда емкостей цепи обмотки при подходе волны длится доли микросекунды. Этот

процесс называется зарядом входной емкости, а устанавливающееся в результате его распределения потенциалов или напряжений вдоль цепи обмотки – начальным распределением напряжения. В начале этого процесса (рис.1) напряжение волны на зажимах трансформатора падает до нуля, а затем волна отражается, и напряжение на зажимах возрастает до двукратного значения амплитуды волны U .

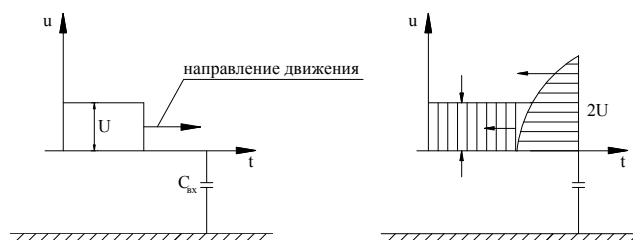


Рис. 1 - Обмотка электродвигателя: а – подход прямоугольной волны напряжения; б – заряд входной емкости

Начальное распределение напряжения. При начальном заряде обмотки токи и электрические заряды распределяются по цепочке продольных емкостей неравномерно, так как по мере продвижения от начала обмотки к ее концу все больше тока и зарядов ответвляется через поперечные емкости на землю. Поэтому через ближайшие к началу обмотки продольные емкости проходит большой ток, и он несет большие электрические заряды, а по направлению к концу обмотки заряды продольных емкостей уменьшаются. В результате и падения напряжения на элементах продольных емкостей уменьшаются от начала обмотки к ее концу. Вследствие этого начальное распределение напряжения вдоль обмотки получается неравномерным.

В случае заземления конца обмотки график изменения относительно земли вдоль обмотки

$$U_x = VA \frac{sha}{sha} x, \text{ а в случае если обмотка}$$

$$\text{незаземлена } U_x = VA \frac{cha}{cha} x. \text{ Эти условия}$$

приняты, если длина обмотки условно равна единице, тогда $\alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}}$.

Обычно $C_q > C_d$ и $\alpha = 5 \dots 15$. При таких значениях α распределение напряжения для заземленных и незаземленных обмоток практически одинаково. Кроме того при $\alpha \geq 5$ распределении напряжения вдоль обмотки весьма неравномерно.

Частотные электромагнитные колебания. Как указывалось ранее, в начальный момент подхода волны перенапряжения заряды не могут проникнуть через индуктивные элементы схемы замещения вследствие чего возникает неравномерное начальное распределение напряжения. Однако при дальнейшем продвижении волны электрические заряды будут проходить также

через индуктивности, и через некоторое время установится конечное распределение. При заземленной нейтрали напряжение будет спадать равномерно к концу обмотки, а у незаземленной обмотки на все протяжении будет одинаковый потенциал.

Ввиду наличия в схеме замещения обмотки индуктивностей и емкостей обмотка в целом и ее части по отношению к быстро протекающим электромагнитным процессам представляют собой колебательные контуры. Период перехода от начального распределения к конечному будет происходить в виде высокочастотных колебаний. При этом амплитуда высокочастотных колебаний напряжения может быть значительной. В отдельных частях обмотки напряжение относительно земли может стать больше напряжения падающей на обмотку волны $U_{л}$. Так, например, при незаземленной нейтрали напряжение в конце обмотки почти удваивается и волна перенапряжений отражается от конца обмотки с почти удвоенной амплитудой. Из-за наличия потерь (электрические потери в обмотках, диэлектрические потери в изоляции и магнитные потери в изоляции, и магнитные потери в сердечнике) эти колебания, в конечном счете, затухают, в результате чего и устанавливается конечное распределение напряжения.

Продолжительность волновых переходных процессов не превышает нескольких микросекунд.

Обычно волновыми процессами в электрических машинах пренебрегают. Их надо учитывать в высоковольтных машинах и трансформаторах, где может произойти пробой изоляции, связанный с появлением перенапряжений на отдельных витках обмоток. У высокочастотных электрических машин емкостные токи искажают распределение тока в обмотках, что приводит к погрешностям в работе.

Электромагнитные переходные процессы. Так как в дальнейшем будут рассматриваться лишь электродвигатели, у которых главное назначение обеспечить заданное значение угловой скорости, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться лишь электромагнитные переходные процессы.

Процессы, происходящие при изменении скорости вращения электродвигателей и электроприводов, называют электромагнитными переходными процессами.

Ограничимся изучением только пуска и динамического торможения двигателя с независимым или параллельным возбуждением, обмотка возбуждения которого была подключена к сети. При этом, пренебрегая реакцией якоря и влиянием коммутационных токов, и примем $\Phi = \text{const}$. Момент сопротивления M_c будет считаться постоянным.

Уравнение равновесия ЭДС цепи якоря, подключенного к сети имеет вид:

$$U = e_{вр} + iR_{я} + L_{я} \frac{di}{dt},$$

где $L_{я}$ - индуктивность цепи якоря;

$R_{я}$ - ее сопротивление;

i - мгновенное значение тока в цепи якоря;

$e_{вр}$ - мгновенное значение э.д.с. вращения на щетках;

$$e_{вр} = k_e \Omega \Phi$$

причем

$$k_e = c_e \frac{60}{2\pi a} \rho = c_m.$$

Вращающий момент, развиваемый двигателем,

$$M = c_m i_{я} \Phi,$$

откуда

$$i_{я} = \frac{M}{c_m \Phi}$$

и

$$\frac{di_{я}}{dt} = \frac{1}{c_m \Phi} \frac{dM}{dt}.$$

Так как

$$M = M_c + M_{\partial},$$

где

$$M_{\partial} = J \frac{d\Omega}{dt},$$

то уравнение может быть переписано в виде

$$U = k_e \Omega \Phi + \frac{R_{я}}{c_m \Phi} M_c + \frac{R_{я}}{c_m \Phi} J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{L_{я}}{c_m \Phi} J \frac{d^2 \Omega}{dt^2}$$

Коэффициент при $\frac{d\Omega}{dt}$ имеет размерность времени - называется электромагнитической постоянной времени:

$$T_{эм} = \frac{R_{я} J}{c_m k_e \Phi^2}.$$

Если ввести, кроме того, электромагнитную постоянную времени цепи якоря

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}})$$

то уравнение движения электропривода может быть переписано в виде

$$\Omega + T_{эм} \frac{d\Omega}{dt} + T_{эм} T_{я} \frac{d^2 \Omega}{dt^2} = \Omega_{уст.})$$

Которое представляет собой линейное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. В зависимости от соотношения между постоянными времени $T_{эм}$ и $T_{я}$ его общее решение может быть либо аperiodическим (при $T_{эм} \geq 4T_{я}$), либо колебательным (при $T_{эм} < 4T_{я}$). Обычно $T_{я} \ll T_{эм}$, и движение ротора двигателя бывает аperiodическое.

Уравнение существенно упрощается при $T_{я} = 0$, что можно предположить у машин с компенсационными обмотками. В этом случае уравнение будет иметь вид:

$$\Omega + T_{эм} \frac{d\Omega}{dt} = \Omega_{уст.},$$

Его решение может быть представлено в виде:

$$\Omega = \Omega_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{ЭМ}}} \right) + \Omega_{нач} e^{-\frac{t}{T_{ЭМ}}}$$

Если $\Omega_{нач} = 0$ (пуск двигателя), то

$$\Omega = \Omega_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{ЭМ}}} \right)$$

Тогда:

$$i = I_{у} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{ЭМ}}} \right) + I_{нач} e^{-\frac{t}{T_{ЭМ}}}$$

Графики скорости вращения $\omega(t)$ или $n(t)$, где $n = \frac{60\Omega}{2\pi}$, и тока $i(t)$ при пуске двигателя изображены

на рис.2, когда $n_{нач} = 0$ и $I_{нач} = \frac{U}{R}$.

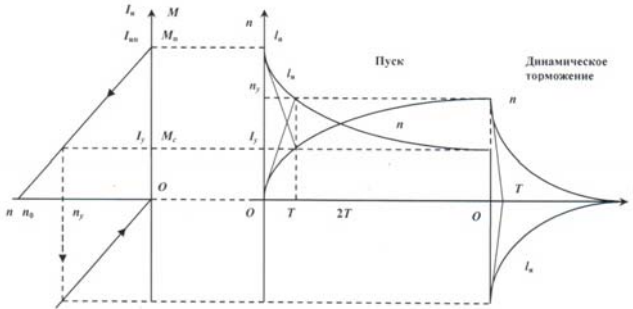


Рис. 2 - Графики разгона и торможения двигателя при $L_{я} = 0$

В этом случае, когда нельзя пренебрегать индуктивностью цепи якоря, ток в обмотке не может мгновенно достичь значения $I_{п} = \frac{U}{R_{я}}$, а приближается к нему по экспоненте:

$$i = I_{п} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{я}}} \right)$$

(тонкая линия на рис.3).

После того, как ток i в момент t_0 достигнет значения $I_{у}$, соответствующего моменту

сопротивления на валу $I_{у} = \frac{M_{с}}{сМ\Phi}$, якорь двигателя

начнет вращаться, и в его роторе будет индуцироваться э.д.с. $e = k_E \Omega \Phi$. Тогда вступит в силу уравнение 1. Нарастание тока i замедлится. В момент t_1 он достигнет максимума. Ускорение

$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{M - M_{с}}{J}$ в этот момент максимально. Затем ток

спадает до значения $I_{у}$, а скорость вращения

приближается к своему установившемуся значению $\Omega_{у}$ по кривым, приближающимся к экспонентам.

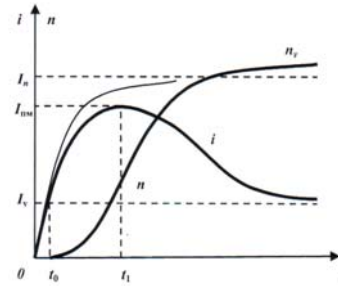


Рис. 3 - Пуск двигателя при $L_{я} \neq 0, T_{ЭМ} > 4T_{я}$

Ток в цепи якоря $I_{нм}$ при пуске превышает номинальный в несколько (3-7) раз и, хотя процесс пуска длится непродолжительное время, потери в цепи якоря могут быть довольно большими, что приводит к соответствующему нагреву обмотки якоря.

Можно выразить электромеханическую постоянную времени через пусковой момент $M_{п}$ и скорость идеального холостого хода Ω_0 :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = J \frac{\Omega_0}{T_{ЭМ}} = M_{п},$$

откуда

$$T_{ЭМ} = J \frac{\Omega_0}{M_{п}} = J \frac{\Omega_{уст}}{M_{п} M_{с}}$$

Реостатный пуск двигателя с параллельным или независимым возбуждением. На рис.4 приведена схема и диаграмма пуска двигателя с параллельным или независимым возбуждением.

Временной график скорости или ускорения для этого случая изображен на рис.4. Если пренебречь индуктивностью в цепи якоря, считая, что $L_{я} = 0$, то процесс пуска по первой ступени целиком повторяет левую часть графика на рис.2 но вместо $n_{у}$ будет $n_{у1}$. Постоянная времени $T_{ЭМ}$ обозначена $T_{Э1}$.

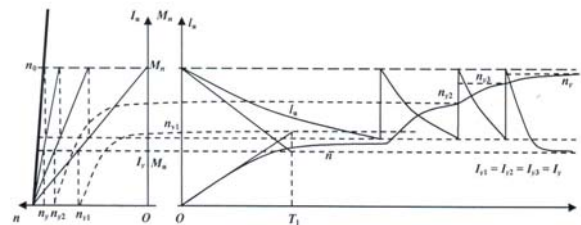


Рис. 4 - Пуск двигателя с выключаемыми сопротивлениями в цепи роторами

Если переключения производить по достижении установившегося значения тока $I_{у}$, то процесс пуска будет слишком длителен. Поэтому переключение ступеней пускового реостата производят при несколько большем токе якоря, например $1,2I_{у}$.

Как только ток спадет до $1,2I_y$, выключают первую ступень. Наблюдается бросок тока до I_n .

В связи с уменьшением сопротивления цепи якоря до $R_{я} = r_{я} + R_{Д2}$, уменьшается постоянная времени

$$T_{ЭМ3} = T_{ЭМ1} \frac{R_{я3}}{R_{я1}} = T_{ЭМ1} \frac{r_{я} + R_{Д3}}{r_{я} + R_{Д1}}$$

Процесс пуска продолжается до выхода на естественную характеристику. После включения последней ступени реостата, ток $i_{я}$ затухает, а скорость вращения нарастает с постоянной времени

$$T_{ЭМ} = \frac{GD^2 r_{я}}{375 c_{ЕсМ} \Phi^2},$$

где $r_{я}$ - сопротивление якорной цепи при выключенных (или закороченных) добавочных сопротивлениях.

Процесс переключения, как правило, производится автоматически: в цепь якоря включается токовое реле, которое управляет контакторами, шунтирующими ступени пускового реостата.

В цепь якоря включена катушка токового реле, имеющего несколько пар нормально замкнутых контактов. Токовое реле срабатывает, и его контакты

размыкаются при токах, больших установленного (например, $1,2I_n$).

Такая схема пригодна для пуска двигателей с любым возбуждением (параллельным, независимым, последовательным, смешанным).

Аналогичным образом строят автоматические схемы пуска в функции времени (программное управление) или в функции скорости вращения.

Литература

1. Александров Н.Н. Электрические машины и микромашины – М: Колос, 1983 -384 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины – Л: Энергия, 1978 – 832 с.
3. Александровская Ю.П. Комплексная оценка эффективности ресурсосбережения на машиностроительном предприятии /Ю.П. Александровская// Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №1 – С. 265-273.
4. Лопухова Т.В., Зацаринная Ю.Н., Балобанов Р.Н. Особенности конструкции трансформаторов с элегазовой изоляцией /Т.В. Лопухова, Ю.Н. Зацаринная, Р.Н. Балобанов// Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №4 – С. 218-221.

© **Р. Р. Моисеева** - асс. каф. электрических станций КГЭУ, milawka-86@mail.ru; **Н. Г. Баженов** - канд. тех. наук, доц. той же кафедры электрического транспорта КГЭУ; **Р. Х. Самигуллина** - доц. той же кафедры; **Ю. Н. Зацаринная** - канд. тех. наук, доц. каф. автоматизированных систем сбора и обработки информации КНИТУ, доц. каф. электрических станций КГЭУ, zac_jul@mail.ru.