

УДК 621.3.011.7

Л.Н. Канов, доцент, канд. техн. наук; С.А. Подпорин

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОГО МОМЕНТА ПРИ НАБРОСЕ НАГРУЗКИ НА СИНХРОННУЮ МАШИНУ С ПОМОЩЬЮ СХЕМНОГО МОДЕ- ЛИРОВАНИЯ

На основании теории Пуанкаре предложена методика расчета предельно допустимого максимального момента при набросе нагрузки на синхронную машину. С помощью схемного моделирования построены фазовые портреты динамики машины и графики зависимости предельно допустимого момента.

К динамическим режимам электропривода относятся режимы работы при переходе из одного установившегося состояния привода к другому, происходящему во время резкого приложения (наброса) нагрузки. Изучение динамических режимов электропривода позволяет правильно оценить мощность двигателя, построить систему управления, оценить производительность и качество работы производственных механизмов. К настоящему времени детально исследованы динамические режимы электроприводов постоянного тока и асинхронных электроприводов. В то же время существует необходимость изучения подобных режимов в синхронных электроприводах, которые применяются в компрессорах, холодильных машинах, камнедробилках и т.п. [1]. Существенным вопросом является оценка предельного момента нагрузки, прикладываемого к синхронной машине. Описанные в литературе методы расчета синхронного привода основываются на моделях, обеспечивающих расчет мгновенных значений токов и напряжений всех элементов привода, а также электромагнитного момента и частоты, например, [2]. Однако эти методы громоздки и мало применимы для оперативной оценки нагрузки привода. Предлагается упрощенная методика расчета предельно допустимого набрасываемого момента на синхронную машину в зависимости от динамики ротора и текущего момента нагрузки.

Синхронная машина развивает электромагнитный момент в зависимости от угла рассогласования θ , выражение которого для явнополюсной машины имеет вид [1]:

$$M(\theta) = \frac{mUE_0}{\omega_1 X_{CH}} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta, \quad (1)$$

где m – число фаз; U – напряжение сети (для двигателя) и напряжение нагрузки (для генератора); E_0 – ЭДС машины; ω_1 – угловая скорость вращения ротора и поля; X_d , X_q – продольные и поперечные индуктивные сопротивления

ния обмоток статора; θ – угол рассогласования между полями статора и ротора. При превышении моментом нагрузки предельно допустимой величины машина выпадает из синхронизма. Упрощенное уравнение динамики ротора представляется выражением [3]:

$$\frac{Jd^2\theta}{dt^2} + \frac{Kd\theta}{dt} + M(\theta) = M, \quad (2)$$

где J – момент инерции ротора и приведенный момент инерции нагрузки; K – коэффициент электромагнитного трения (сцепления полей статора и ротора), связанного со скольжением обмотки ротора относительно поля; M – момент нагрузки; $M(\theta)$ – электромагнитный момент машины, определяемый выражением (1). Для удобства дальнейших выкладок перепишем выражение (1) в следующем виде:

$$M = A_1 \sin \theta + A_2 \sin 2\theta. \quad (3)$$

Здесь $A_1 = \frac{mUE_0}{\omega_1 X_{CH}}, A_2 = \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right).$

Для анализа предельно допустимого момента удобно вместо уравнения (2) использовать уравнение первого порядка на фазовой плоскости

$$\frac{dy}{dx} = \frac{M - M(x) - Ky}{Jy}, \quad (4)$$

где фазовые переменные $x = \theta, y = \frac{d\theta}{dt}$, а также его схемную модель (рисун

ок 1), состоящую из емкостей $C_1 = -J$; $C_2 = -1$; проводимости $g = K$; независимого источника постоянного тока M и управляемых источ-

ников тока $M(x)$ и $y = \frac{dx}{dt}$. Стаци-

онарному режиму машины соответствует $y_0 = 0$, тогда из уравнения (4) получаем $M - M(x) = 0$. На рисунке 2 показан график этого выражения, из которого следует, что имеются два состояния равновесия: x_{01} и x_{02} ; $0 < x_{01} < x_{02} < \pi$; причем x_{01} соответствует устойчивому равновесию, а x_{02} – неустойчивому. Для пояснения этого утвержде-

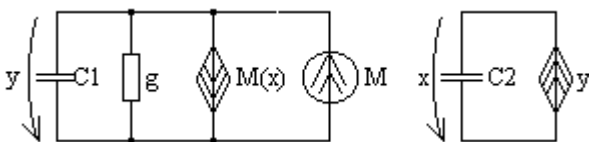


Рисунок 1 – Упрощенная схемная модель синхронной машины

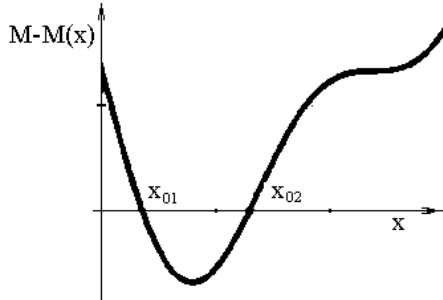


Рисунок 2 – График функции $M-M(x)$

ния в уравнении (4) выполним следующую замену переменных: $X = x - x_{oi}$, $i = 1$ или 2 , тогда $dx = dX$, и уравнение (4) с учетом обозначений (2) принимает вид:

$$\frac{dy}{dX} = \frac{M - A_1 \sin(X + x_{oi}) - A_2 \sin 2(X + x_{oi}) - Ky}{Jy} = \frac{M - M(X) - Ky}{Jy}.$$

Таким образом, точка $X=0$ является корнем уравнения $M - M(x) = 0$, и следовательно, в окрестностях этой точки данная функция ведет себя как прямая $k_1 X$, где $k_1 < 0$ (что соответствует точке x_{o1}), или как $k_2 X$, где $k_2 > 0$ (что соответствует точке x_{o2}).

Согласно теории Пуанкаре [4] в дифференциальном уравнении вида

$$\frac{dy}{dx} = \frac{ax + by}{cx + dy}$$

существует несколько типов особых точек в зависимости от коэффициентов a, b, c, d . В случае уравнения (4) имеем: $a = k_1 < 0$ или $a = k_2 > 0$; $b = -K < 0$; $c = 0$; $d = J > 0$. Так как $ad - bc > 0$ для $a = k_2$, то особая точка x_{o2} является седловой (т.е. точкой неустойчивого равновесия). Для $a = k_1$ имеем $ad - bc < 0$, следовательно, особая точка x_{o1} есть либо устойчивый узел (при $K^2 + 4k_1 J > 0$), либо устойчивый фокус (при $K^2 + 4k_1 J < 0$).

В соответствии с этим фазовый портрет переходного процесса наброса нагрузки имеет вид, показанный на рисунке 3. Кривая 2 – сепаратриса, отделяющая устойчивый переходный процесс от неустойчивого, а точка x_{o2} – седловая точка неустойчивого равновесия (неустойчивость видна на рисунке 5, кривая 2). Угол рассогласования θ , соответствующий x_{o2} , является

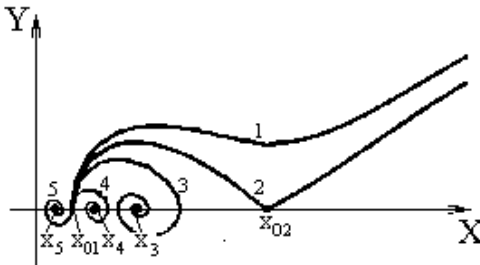


Рисунок 3 – Фазовый портрет переходного процесса

предельным углом, при превышении которого машина выходит из синхронизма. Задача состоит в отыскании и исследовании предельного момента нагрузки, который можно прикладывать к машине, чтобы в результате переходного процесса данный угол θ не превышался. Фазовые траектории, лежащие левее седловой точки на оси абсцисс (кривые 3-5), являются устойчивыми, и переходный процесс наброса (либо сброса) нагрузки заканчивается в устойчивых точках (соответственно x_3, x_4, x_5). Кривая 1 не

имеет устойчивых точек и потому соответствует неустойчивому переходному процессу выхода машины из синхронизма, когда угол рассогласования θ неограниченно нарастает. Все фазовые траектории в начальный момент времени имеют своим началом точку x_{01} , соответствующую в рассматриваемом случае стационарному режиму работы с углом $\theta = 0,2$ рад. Начальную точку x_{01} можно найти расчетом схемной модели с начальными условиями на емкостях $u_{C1}(0)=0$; $u_{C2}(0)=x_{02}$. Отрицательные значения этих емкостей обеспечивают решение дифференциального уравнения (4) в обратном времени.

Таким образом, порядок решения задачи определения предельно допустимого момента M_m следующий. Задаемся моментом M_m , не превышающим максимума выражения (1). Решая уравнения (3), определяем особую точку x_{02} . С начальными условиями на емкостях, соответствующими седловой точке $(x_{02}, 0)$, рассчитываем схемную модель до момента пересечения фазовой траекторией (сепаратрисой) оси абсцисс. Подставив полученную граничную точку x_{01} в выражение (3), получим соответствующий ей стационарный текущий момент нагрузки. Таким образом, если к машине, работающей с этим моментом, приложить момент несколько больший M_m , то часть сепаратрисы вблизи точки x_{01} сместится вправо, и точка x_{01} окажется в области начальных условий, соответствующих неустойчивым переходным процессам.

Поступая подобным образом для ряда значений момента нагрузки от нуля до максимально возможного значения из выражения (1), получаем ряд текущих стационарных моментов. Далее подобная процедура повторяется для других значений коэффициента электромагнитного трения.

Решение описанной задачи выполнено на примере судового генератора МСС 82-4 мощностью 30 кВт, с частотой вращения 1500 об/мин, напряжением $U=230$ В, моментом инерции $2,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, значениями $A_1=47,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $A_2=23,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$. На рисунке 4 показаны зависимости предельно допустимого момента M_m при набросе нагрузки от текущего момента для ряда значений коэффициента K . Из графиков следует, что с ростом текущего момента нагрузки растет и предельно допустимый момент M_m . Кроме того, по мере роста коэффициента электромагнитного трения M_m также растет, что объясняется меньшей скоро-

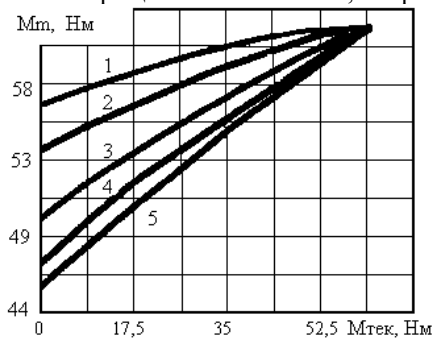


Рисунок 4 – Зависимость максимального момента от текущего: 1 – $K=30$; 2 – $K=7$; 3 – $K=5$; 4 – $K=2,5$; 5 – $K=1$

стью протекания переходного процесса, меньшей амплитудой качаний, и следовательно, меньшей возможностью выйти из синхронизма.

Из условия $K^2 + 4k_1 J = 0$ легко найти значение критического коэффициента трения K , отделяющего колебательный переходный процесс от апериодического. Учитывая, что на большей части кривой (рисунок 1) в точке x_{01} коэффициент k_1 составляет примерно 90, получаем $K_{кр} \approx 30$. Таким образом, при апериодическом переходном процессе предельно допустимый набрасываемый момент возрастает и приближается к максимально возможному значению 61,7 Н·м.

На рисунке 5 показаны переходные процессы, происходящие при набросах различных моментов нагрузки на машину, стационарно работающую с коэффициентом $K=5$, текущим моментом $M=20$ Н·м и соответствующим ему углом рассогласования $\theta=0,2$ рад. Предельно возможный набрасываемый момент при данных условиях составляет примерно 57,2 Н·м. Этому моменту соответствует критический переходный процесс (кривая 2). При моментах, превышающих предельно допустимый, наблюдается неустойчивый процесс выхода машины из синхронизма с неограниченным нарастанием угла θ ; при небольших моментах нагрузки имеет место устойчивый колебательный процесс; самому малому моменту нагрузки на рисунке $M=10$ Н·м соответствует уменьшение угла рассогласования (кривая 5).

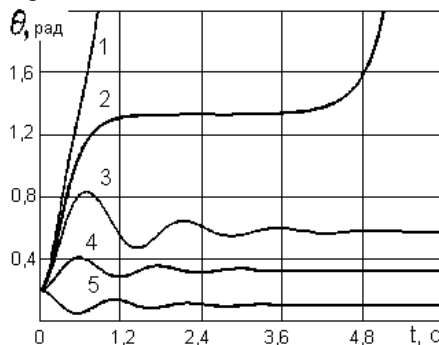


Рисунок 5 – График качаний ротора машины: 1 - $M=66$ Н·м; 2 - $M=57$ Н·м; 3 - $M=48$ Н·м; 4 - $M=30$ Н·м; 5 - $M=20$ Н·м

Таким образом, предложенная методика определяет регулярную процедуру нахождения максимально возможной нагрузки синхронной машины. Наибольшую нагрузку можно подавать на машину в случае значительного коэффициента электромагнитного трения, что соответствует жесткому сцеплению полей статора и ротора. В дальнейшем представляется перспективным выполнить исследования по конкретизации выражения коэффициента электромагнитного трения через параметры машины.

Библиографический список

1. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с.
2. Галинишников Ю.П. Исследование регулируемого электропривода на основе синхронного двигателя с использованием имитационной компьютерной модели /

Ю.П. Галишников, А.Ю. Шулепов // Изв. вузов. Электромеханика. — 2000. — № 2. — С. 103–108.

3. Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах / Дж. Стокер. — М.: Иностран. лит., 1952. — 264 с.

4. Баутин Н.Н. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости / Н.Н. Баутин, Е.А. Леонтович. — М.: Наука, 1990. — 488 с.

Поступила в редакцию 16.02.2001 г.