

УДК 621.313.001.63

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРАБЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Береза Б.П., Олейников А.М.

Рассматривается один из путей оптимизации динамических характеристик корабельного электропривода при заданных условиях его эксплуатации путем изменения его конструктивных параметров.

На современных кораблях мощность многих электромеханизмов динамического режима работы составляет сотни киловатт и имеет тенденцию к дальнейшему увеличению.

Они могут составлять в зависимости от проекта корабля от 30 до 50 % общего числа корабельных потребителей.

В качестве электропривода данных механизмов используются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (АДКР) единой серии морского исполнения. Последние характеризуются простотой конструкции и обслуживания, высокой надежностью и экономичностью. Однако повышение требований к уровню физических полей современного корабля, а также широкомасштабное использование на нем управляемого и регулируемого электропривода требует совершенства определенных свойств данных АД. В настоящее время предложен ряд конструктивных решений, которые кроме перечисленных преимуществ АД обеспечивают улучшение его регулировочных, динамических и виброакустических характеристик. Это относится, прежде всего, к использованию перспективной конструкции ротора с частотно-зависимыми электромагнитными параметрами, которые обуславливают необходимые свойства двигателей. Одним из них является асинхронный двигатель с двухслойным ротором (АДДР), обладающий относительно мягкой механической характеристикой, практически отсутствием зубцовой пульсации и очень хорошими пусковыми свойствами.

В настоящее время разработаны теория и методы расчета характеристик АДДР.

Однако в теории АДДР остается открытым направление моделирования его переходных процессов, вопросы оптимизации динамических, регулировочных характеристик. Требуют совершенствования методики расчетов конструктивных параметров ротора АДДР с целью получения оптимальных характеристик, исходя из условий работы электромеханизма (задача оптимального управления). А также снижение влияния работы электропривода на корабельную сеть.

Предлагаемая методика позволяет решить задачу оптимизации динамических характеристик АДДР за счет варьирования его конструктивными параметрами при заданных ограничениях по энергетическим показателям электрической машины.

В качестве динамических характеристик АДДР в методике могут использоваться следующие показатели работы электрической машины:

$$I_n, M_n, M_{нач.пуск}, M_{min.пуск}, \frac{M_{нач.пуск}}{M_{ном.}}, \frac{M_{min.пуск}}{M_{ном.}}, \frac{I_{пуск}}{I_{ном.}}, D_{пуска}.$$

Они являются целевой функцией или критерием оптимизации. Их выбор определяется характеристиками приводного механизма, а также условиями его работы в корабельной электрической сети.

К конструктивным параметрам, которые варьируются, относятся относительная магнитная проницаемость материала гильзы ротора μ , его удельное электрическое сопротивление ρ и высота h , а также величина воздушного зазора δ . Методика, реализованная в виде программного продукта, позволяет осуществлять поиск таких значений параметров, при которых обеспечивается экстремум выбранной целевой функции и нахождении энергетических показателей машины $\cos \phi$, η в допустимой области ограничений.

Как известно, наиболее распространенным и экономически выгодным путем создания АДДР является модернизация уже существующего образца АДКР путем замены короткозамкнутого ротора на двухслойный. При этом статор двигателя не изменяется. В связи с этим исходными данными для методики являются: обмоточные данные статора исходного АДКР и его геометрические размеры; семейство статических характеристик кривых намагничивания и удельное сопротивление материала гильзы ротора; область ограничения энергетических показателей машины.

В основу методики положена математическая модель АДДР. Она получена на основе совместного использования положений теории электрического поля, позволяющая уточнить параметры ротора АДДР в широком диапазоне изменения скольжения, рассчитанные итерационным путем по следующим формулам

$$R_2' = \frac{4m \left(w_1 k_{w_1} \right)^2 \cdot \rho \cdot L}{\pi \cdot B_p \cdot h} \cdot \xi \cdot \frac{sh 2\xi + \sin 2\xi}{ch 2\xi - \cos 2\xi};$$

$$X_2' = \frac{4 \left(w_1 k_{w_1} \right)^2 \cdot m \cdot \omega_0 \cdot L \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot h}{3\pi \cdot B_p} \cdot \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{sh 2\xi - \sin 2\xi}{ch 2\xi - \cos 2\xi};$$

$$X_{\mu} = \frac{m(w_1 k_{w_1})^2 \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot D_p \cdot l}{p^2} \cdot \frac{\mu \cdot ch(\frac{\pi h}{\tau})}{\pi \cdot \delta \cdot \mu \cdot ch(\frac{\pi h}{\tau}) + \tau \cdot sh(\frac{\pi h}{\tau})},$$

$$\text{где } R'_{20} = \frac{4m(w_1 k_{w_1})^2 \cdot \rho \cdot L}{\pi \cdot B_p \cdot h_b}; \quad X'_{20} = \frac{4(w_1 k_{w_1})^2 \cdot m \cdot \omega \cdot l \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot h}{3\pi \cdot B_p}; \quad \xi = \frac{h}{\Delta} -$$

относительная глубина проникновения поля в тело ротора;

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot s}} - \text{глубина проникновения поля в тело ротора.}$$

Учитывается также теория обобщенной электрической машины, позволяющая описывать динамику переходного процесса с учетом фактического изменения параметров ротора во всем диапазоне скольжения основу которой составляет система уравнений электромеханического преобразования энергии обобщенной электрической машины представленной в u, v координатах в форме Коши относительно потокоцепления

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{(1,u)}}{dt} &= V_{(1,u)} - \frac{R_1 \cdot L_2}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot \psi_{(1,u)} + \frac{R_1 \cdot L_{12}}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot \psi_{(2,u)} + \omega \cdot \psi_{(1,v)}; \\ \frac{d\psi_{(1,v)}}{dt} &= V_{(1,v)} - \frac{R_1 \cdot L_2}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot \psi_{(1,v)} + \frac{R_1 \cdot L_{12}}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot \psi_{(2,v)} + \omega \cdot \psi_{1,u}; \\ \frac{d\psi_{(2u)}}{dt} &= -\frac{L_2 \cdot L_1}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot \psi_{(1,u)} + \frac{R_2 \cdot L_{12}}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot \psi_{(1,u)} + (\omega_0 - \omega_p) \cdot \psi; \\ \frac{d\psi_{(2,v)}}{dt} &= -\frac{R_2 \cdot L_1}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot \psi_{(1,v)} + \frac{R_2 \cdot L_{12}}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot \psi_{(1,v)} + (\omega_0 - \omega_p) \cdot \psi_{2u}; \\ \frac{d\omega_p}{dt} &= \frac{\rho}{J} \left[\frac{3}{2} \rho \cdot \frac{L_{12}}{(L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2)} \cdot (\psi_{(1,v)} \cdot \psi_{(2,v)}) - M_c \right] \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Математическая модель реализована в виде программного продукта. Для решения системы уравнений (1) использован метод Рунге-Кутты-Мерсона с автоматическим выбором шага, что позволило значительно уменьшить вероятность возникновения числовой неустойчивости, сократить время расчета при сохранении высокой точности, получить более равномерное распределение точек графиков кривых тока, момента, частоты вращения. Адекватность математической модели АДДР подтверждена натурными экспериментами.

Для оптимизации динамических характеристик АДДР, на основе сопоставительного анализа систем поисковой оптимизации [1] и результатов произведенных вычислительных экспериментов, выбран метод последовательного запуска.

Поиск оптимума осуществляется в 2 этапа. На первом этапе проверяется нахождение энергетических показателей машины в допустимой области ограничений. На втором этапе рассчитывается целевая функция и осуществляется поиск ее экстремума. На рисунке 1 показана структурная схема оптимизации динамических характеристик АДДР.

Алгоритм решения задачи рассмотрим на примере оптимизации добротности пуска АДДР (D_n - max) за счет варьирования

электромагнитных параметров материала гильзы ротора μ , ρ и геометрических параметров - высоты гильзы ротора h и величины воздушного зазора δ . При этом введем ограничения по энергетическим показателям машины : $\cos \varphi$, η - к.п.д.

Движение начинается вдоль оси μ при постоянных начальных значениях ρ_n , h_n , δ_n . Пошаговое приращение параметров $\mu_i = \mu_{i-1} + \Delta\mu$ осуществляется до вхождения энергетических показателей $\cos \varphi$, η в допустимую область ограничений. После чего продолжается наращивание μ до нахождения значения $\mu_{\text{опт}}$, которому соответствует максимальное значение целевой функции $D_n = f(\mu) - \max$. При этом для каждого нового значения μ_i производится проверочный расчет нахождения $\cos \varphi$, η в допустимой области ограничений. Затем из найденной точки $\mu_{\text{опт}}$ направление поиска меняется. Движение начинается вдоль оси h при $\mu_{\text{опт}}$ и начальных значениях δ_n , ρ_n , при этом для каждого фиксированного значения h продолжается оптимизация по направлению μ . Как и на первом этапе, сначала осуществляется вход в допустимую область ограничений, а затем осуществляется поиск значения $h_{\text{опт}}$, при котором $D_n = f(h) - \max$. В дальнейшем движение осуществляется аналогично по осям δ , ρ . Поиск заканчивается нахождением значений $\mu_{\text{опт}}$, $h_{\text{опт}}$, $\delta_{\text{опт}}$, $\rho_{\text{опт}}$, при которых $D_n = f(\mu_{\text{опт}}, \delta_{\text{опт}}, \rho_{\text{опт}}, h_{\text{опт}}) - \max$.

В общем случае, двигаясь вдоль оси параметра $x_j = (\mu_j, h_j, \delta_j, \rho_j)$, для каждого текущего значения $x_j = x_j(t)$ производится оптимизация функции по ортогональным направлениям $x_1 = \mu$, $x_2 = h$, $x_3 = \rho$, $x_4 = \delta$. Иначе, в гиперплоскости $x_j = x_j(t)$ подпространства $\Pi_j (x_{j+1} = \text{const}, x_n = \text{const})$ определяется лучшая точка и из этой точки делается перемещение вдоль оси x_j на новую гиперплоскость $x_j = x_j^{(t+1)}$ и так до тех пор, пока не получится наилучшая точка в подпространстве. Найденная точка принимается исходной для изменения движения по направлению x_{j+1} (т.е. оптимизация целевой функции $D_n = f(x_j)$ в подпространстве большего измерения).

Если очередное перемещение вдоль оси x_j переводит систему за допустимую область, то с целью возврата в нее на соответствующих гиперплоскостях производится оптимизация по вспомогательной функции, характеризующей область ограничений $\cos \varphi = f(\mu, \delta, \rho, h)$ или $\eta = f(\mu, \delta, \rho, h)$. В этом случае учитывается также направление улучшения функции $D_n = f(\mu, \delta, \rho, h)$. После возврата в допустимую область оптимизации вспомогательная функция $\cos \varphi = f(\mu, \delta, \rho, h)$ или $\eta = f(\mu, \delta, \rho, h)$ заменяется на основную $D_n = f(\mu, \delta, \rho, h)$.

Если система при максимизации вспомогательной функции не попадает в допустимую область, предусмотрен поворот осей на 45° . Поворот ортогональных осей поиска производится также после того, как система в допустимой области исчерпала возможности с начальным шагом найти лучшую точку. После поворота осей при достижении нового

приближения к экстремуму $D_n = f(\mu, \delta, \rho, h)$ с начальным шагом поиск в окрестности x_j повторяется с минимальным шагом.

С использованием предложенной методики произведен расчет конструктивных параметров асинхронных двигателей различных типов, обеспечивающих максимум добротности пуска ($D_n - \max$) при ограничениях по энергетическим показателям ($\cos \phi > 0,7$, к.п.д. $\eta > 0,75$). В таблице 1 представлены расчетные значения электромагнитных и геометрических параметров ротора, обеспечивающих оптимум добротности пуска электродвигателя. Для сравнения в ней показаны характеристики исходного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и натурального образца АДДР, выполненного без учета оптимизации.

Полученные в процессе расчета показатели переходного процесса - пуска асинхронного двигателя показали, что, варьируя электромагнитными и геометрическими параметрами двухслойного ротора, можно добиться таких динамических характеристик корабельного электропривода, которые соответствовали бы в полной мере условиям его работы.

Выводы. Совместное использование математической модели АДДР для расчета переходных процессов и метода последовательного спуска позволило разработать методику оптимизации динамических характеристик данного электрического двигателя. Предложенная методика позволяет провести модернизацию существующих асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором единой серии под тяжелые условия динамического режима работы отдельных корабельных электромеханизмов, рассчитать с высокой степенью точности геометрические и электромагнитные параметры ротора, обеспечивающие оптимальные динамические характеристики корабельного электропривода, которые в полной мере удовлетворяли бы режиму работы электромеханизма, или снижали влияние его работы на корабельную сеть.

Библиографический список

- 1 Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин / А.А.Терзян. — М.: Энергоатомиздат 1989. — 255 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П.Копылов— М.: Высш. шк., 1987. — 248 с.
3. Копылов И.П. Применение вычислительных машин в инженерно — экономических расчетах / И.П.Копылов. — М.: Высш. шк., 1983. — 248 с.
4. Вейц В.Л. Динамика управляемого электро-механического привода с асинхронными двигателями / В.Л.Вейц, П.Ф.Вербовой. — Киев: Наук думка, 1988. — 271 с.

Поступила в редакцию 30.11.2001 г.