

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Проведён анализ математической модели линейного синхронного двигателя, составленной на базе уравнений Парка-Горева для синхронной машины. Выполнено эквивалентирование, позволяющее разделить переходные процессы на электромагнитные и электромеханические. Рассматривается вопрос о выборе угла нагрузки для работы двигателя в системе синхронного электропривода.

Синхронный линейный двигатель (ЛСД) является одним из вариантов тягового электродвигателя для перемещения наземных транспортных средств.

Математическая модель линейного синхронного двигателя может быть составлена на базе уравнений Парка – Горева для синхронной машины [1]. Учитывая только основные гармоники токов и напряжений, принимая распределение магнитных полей самоиндукции и взаимоиндукции синусоидальными, а путевую статорную обмотку симметричной, уравнения ЛСД без демпферной обмотки в системе координат  $d$  и  $q$  в относительных единицах можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_d &= (p + \rho_d)E_{(d)} - (1-s)E_q + pE_0; \\ U_q &= (1-s)E_{(d)} + (p + \rho_d)E_q + (1-s)E_0; \\ E'_d &= \mu E_d + E_0 = const; \\ F_c &= \frac{(E_0 E_s)}{x_d} + H_j ps, \end{aligned}$$

где  $U_d$ ,  $U_q$  и  $E_d$ ,  $E_q$  – напряжения и э.д.с. самоиндукции по осям  $d$  и  $q$ ;  $E'_d$  – переходная э.д.с.;  $E_0$  – э.д.с., индуцируемая в обмотке статора магнитным полем обмотки возбуждения;  $s$  – скольжение, выбранное положительным для двигательного режима;  $\rho = r_a / x_d$  – отношение активного и индуктивного сопротивления фазной обмотки статора;  $F_c$  – сила сопротивления движению ротора;  $\mu$  – коэффициент магнитной связи обмотки возбуждения с обмотками статора:

$$\mu = \frac{3 M_{afd}^2}{2 L_a L_f},$$

где  $M_{afd}$ ,  $L_a$ ,  $L_f$  – коэффициент взаимоиндукции обмотки возбуждения с обмоткой статора и коэффициенты самоиндукции соответствующих обмоток;  $p$  – оператор дифференцирования;  $H_j$  – постоянная для данной машины величина:

$$H_j = m \frac{\tau^2 \omega_0^3}{\pi^2 P_\sigma},$$

где  $m$  – масса транспортного средства;  $\omega_0$  – круговая частота источника питания;  $\tau$  – полюсное деление путевой обмотки. За базисные величины силы  $F_\sigma$  и скорости  $V_\sigma$  приняты

$$F_\sigma = \frac{P_\sigma}{V_\sigma}; \quad V_\sigma = \frac{\tau}{\pi} \omega_0$$

Полученная система уравнений (1) неудобна для анализа, поскольку требует применения численных методов и вычислительной техники для её решения. Вместе с тем, как показывает практика расчётов, введение некоторых упрощающих предположений позволяет уменьшить объём вычислительных работ без принципиального снижения точности решений.

При пятикратной перегрузке по току статора для неаварийных режимов работы ЛСД изменение тока возбуждения составляет не более 1,5% от его среднего значения. Это позволяет принять условие

$$E_0 = const,$$

которое часто используется при исследовании линейного синхронного двигателя.

Другой особенностью переходных процессов в ЛСД является характер их протекания. При резких изменениях входных электрических величин, например, тока, напряжения, частоты возникающий переходный процесс можно условно разделить на два последова-

тельно развивающихся процесса – электромагнитный и электромеханический. Первый процесс, связанный с магнитной инерцией, протекает весьма быстро при практически постоянной скорости транспортного средства. После его окончания можно пренебречь производными неустановившихся токов и напряжений ввиду их малости и в дальнейшем расчёт переходного режима свести к уравнению движения транспортного средства.

Объяснение этого положения заключается в большом отличии электромагнитной и инерционной постоянных времени ЛСД. Постоянная времени затухания апериодических токов в статоре имеет порядок  $10^{-3}$  с., а инерционная постоянная времени

$$T_j = \frac{mV_n}{F_n},$$

где  $V_n$  и  $F_n$  – номинальные скорость и силы тяги ЛСД имеет порядок  $10^1$  с.

Отмеченная особенность протекания переходных процессов характерна и для общепромышленных синхронных машин. В случае тягового линейного синхронного двигателя она более явно выражена в связи со сравнительно высоким активным сопротивлением обмоток статора и большой массой ротора.

На основании вышеизложенного уравнения ЛСД без демпферной обмотки для электромагнитного переходного процесса, протекающего без нарушения синхронизма, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} U_d &= (p + \rho_d)E_d - E_q \\ U_q &= (p + \rho_d)E_q + E_d + E_0 \end{aligned}$$

Полученная система линейных уравнений позволяет с достаточной степенью точности анализировать электромагнитный переходный процесс в линейном синхронном двигателе.

Для описания электромеханического переходного процесса ЛСД, протекающего без потери двигателем синхронизма, система уравнений, имеющая вид:

$$\begin{aligned} U_d &= (p + \rho_d)E_d - E_q \\ U_q &= (p + \rho_d)E_q + E_d + E_0 \\ F_c &= \frac{E_0 E_q}{x_d} + H_j p s \end{aligned}$$

остаётся нелинейной и её решение не выражается в квадратурах, однако значительно упрощается в связи с понижением порядка дифференциального уравнения.

При проектировании ЛСД обычно задаются значениями номинальной скорости транспортного средства и необходимой при этом номинальной тяговой силы. Сила тяги может быть обеспечена при различных значениях угла сдвига магнитных полей статора и ротора  $\Theta$ . В связи с этим возникает задача определения его оптимального значения.

Расходы на эксплуатацию синхронного электропривода можно характеризовать энергетическим критерием, состоящим из произведения коэффициента полезного действия  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$ ,

$$\eta \cos \varphi = \frac{P_{\text{мех}}}{S}$$

При заданной механической мощности привода  $P_{\text{мех}}$  максимум энергетического критерия соответствует минимуму потребляемой полной мощности  $S$ . Для большинства преобразователей уменьшения максимального значения  $S$  означает уменьшение стоимости преобразователя частоты. Преобразуя уравнения напряжений статора ЛСД:

$$U^2 = E^2 (\rho_d^2 + 1) + E_0^2 + 2E_0 (E_d + \rho_d E_q)$$

Находим, что минимальная полная мощность при заданной механической мощности будет при условии выбора угла нагрузки:

$$\Theta = \pi - \tan^{-1} \frac{1}{\rho_d}$$

Таким образом, максимальную полную мощность, отдаваемую преобразователем частоты, следует выбирать из условия максимальной требуемой механической мощности ЛСД, работающего при угле нагрузки в соответствии с записанным условием.

При номинальной механической мощности двигателя можно стремиться обеспечить работу ЛСД при максимуме коэффициента полезного действия, что соответствует углу  $\Theta = 90^\circ$ . В этом случае ток и напряжение двигателя не должны превышать максимальных значений, выбранных при максимальной полной мощности двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.

*В.Е. ЕГОРОВ*

### **О БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В XXI ВЕКЕ**

В аннотируемой статье рассмотрены субъективные и объективные факторы, определяющие надежность и безопасность энергетики. Показано, что при проектировании и строительстве новых электростанций необходимо учитывать проектные и запроектные форс-мажорные обстоятельства и особенно их сочетание. При анализе технической безопасности сделан вывод, что существующая противоаварийная автоматика электростанций не в полной мере отвечает требованиям надежности и безопасности и отсутствует комплекс нормативной документации по безопасности.

В выводах по статье отмечается: необходимо повысить статус энергетики (Энергетика – компонент национальной безопасности); надежность и безопасность стоят больших денег, требуется совершенствовать противоаварийную автоматику; необходимо создавать независимую службу безопасности.

В предыдущих статьях рассматривались отдельные аспекты состояния электроэнергетики в настоящее время.

При исследовании такого важного вопроса, как безопасность электростанции (ЭС), необходимо в основу анализа положить соответствие системы безопасности реальным условиям и тенденциям развития угроз для энергетики.

Основным источником информации должна служить статистическая информация об авариях и техногенных катастрофах и их причинах на электростанциях. В XX веке указанную работу выполняла фирма «ОРГРЭС» при Минэнерго. В настоящее время эта работа не ведется, так как новых частных владельцев генерирующих компаний (ГК) интересуют в первую очередь вопросы прибыли и дивидендов, а потом все остальное, но уже по остаточному принципу.

Ростехнадзор, по причине своей загрузки, вопросам безопасности ЭС не может уделить должного внимания. Ошибочно ликвидированная организация Энергонадзор, как самостоятельная единица, не восстанавливается по неизвестным причинам.

Сравним надежность работы блоков ЭС во второй половине XX века с современностью: например, Волховская ГЭС – немецкая авиация не смогла даже разбомбить плотину, а по дну Ладожского озера в условиях войны были проложены кабельные линии. Об остановке блоков ГЭС никто даже подумать не мог, не то чтобы остановить их из-за технической неисправности.

В настоящее время неплановая аварийная остановка блоков на электростанциях по разным причинам происходит по несколько раз в год.

Общественное сознание лихорадят события, произошедшие в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) ряда стран, в том числе, и России. Несмотря на мажорный тон заявлений руководителей проектирующих и эксплуатирующих компаний, аварии и техногенные катастрофы следуют одна за другой, причём, нарастающим итогом, как по частоте, так и по ущербу.