
ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ УПРАВЛЯЕМОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Технологические комплексы, оборудованные турбомеханизмами (насосами, вентиляторами, компрессорами), относятся к одним из наиболее энергоемких и сложных электромеханических систем (ЭМС), режимы работы которых зависят от характеристик и параметров электропривода, технологического механизма, трубопроводной сети, запорно-регулирующей арматуры, потребителя. В большинстве случаев, характеристики элементов в статических и динамических режимах нелинейные, зависящие от целого ряда факторов. Изменение параметров одной из подсистем существенно влияет на функционирование всего технологического комплекса. Так, например, эффективность работы гидротранспортного комплекса определяется паспортными характеристиками, схемой включения (параллельной или последовательной) и числом одновременно работающих насосов, параметрами гидродинамической сети (противодавлением и гидравлическим сопротивлением), характеристиками и условиями срабатывания запорно-регулирующей арматуры, наличием кавитационных процессов в гидросети, выбором метода регулирования технологических параметров и т.д. [1, 2].

Любая ЭМС функционирует в условиях воздействия различного рода факторов: управляющих, возмущающих и задающих воздействий, изменяющихся в процессе работы, и возникающих как в нормальных (эксплуатационных), так и в нештатных (аварийных) ситуациях. Режим работы ЭМС характеризуется электрическими, энергетическими и механическими параметрами: напряжением, током, мощностью, частотой вращения и моментом; технологическими параметрами: производительностью, давлением на выходе технологического механизма и в трубопроводной сети, и т.д.

Качественное управление технологическим комплексом неразрывно связано с процессами энергоуправления и энергопреобразования в ЭМС. Для решения задачи весьма важно знать, обладает ли объект свойством управляемости или нет, при этом ЭМС может состоять из подсистем с разной степенью управляемости. Снижение управляемости системы происходит в результате проявления специфических свойств электромеханического оборудования, срабатывания элементов с нелинейными характеристиками и характеризуется определенными условиями перетока энергии во всех звеньях технологической цепи. Повышение управляемости объекта направлено на обеспечение экономичных режимов энергопотребления и требуемой технологической надежности. Применительно к гидротранспортному комплексу, эти вопросы важны при управлении технологическими параметрами насосной установки с целью обеспечения рациональных энергетических режимов работы турбомеханизмов; при управлении процессами, протекающими в ходе развития последствий аварийного отключения насосов, резкого закрытия клапанов и др., в результате чего разрывается функциональная связь между подсистемами электромеханического комплекса и теряется возможность управлять процессами в предаварийный или аварийный периоды.

Для анализа протекания тех или иных процессов, оценки состояния ЭМС в теории автоматического управления, теории автоматизированного электропривода используются такие понятия как устойчивость и чувствительность системы, показатели качества переходного процесса и показатели регулирования скорости электропривода, и т.п.

Устойчивость системы определяется внутренними свойствами самой системы и не зависит от характера действующих на нее возмущений. Устойчивость или неустойчивость системы характеризуется расположением корней ее характеристического уравнения. Для ее исследования существует целый ряд методов (алгебраических и частотных), разработаны критерии и подходы повышения устойчивости систем [2, 3]. Таким образом, устойчивость системы имеет строгую математическую формулировку, однако, эта характеристика не отражает изменение энергетических процессов в системе.

Устойчивость системы - необходимое, но далеко не достаточное условие ее практической пригодности. Качество системы определяется, прежде всего, точностью управления каким-либо объектом или процессом. Для оценки качества управления ЭМС разработаны критерии или показатели качества, к которым относятся точность, запас устойчивости, быстродействие и т.д. Критериями запаса устойчивости служат величина перерегулирования, число колебаний переходного процесса, его затухание и колебательность, то есть параметры, имеющие известное математическое описание [3 -5].

Из-за целого ряда причин (износа, влияния различного рода внешних факторов) фактические показатели качества функционирования системы отличаются от расчетных. Чувствительность – свойство системы изменять свои выходные характеристики (показатели качества) при отклонении тех или иных параметров от расчетных (номинальных) значений. Количественно это свойство оценивается функциями чувствительности, позволяющими определить в каждый момент времени фактическое значение дополнительного движения при известных вариациях параметров [5].

Для анализа регулировочных характеристик электропривода известны такие показатели как жесткость механических характеристик, экономичность, точность, плавность регулирования и т.п., которые, однако, не затрагивают особенностей и требований, вытекающих из взаимосвязи электропривода с технологическим механизмом [6 -7]. В настоящее время отсутствует четкая формализация этих показателей.

При оценке качественных характеристик ЭМС, для решения вопросов повышения их экономичности и надежности необходимо ориентироваться на интегрированные оценки, учитывающие как свойства систем привода, так и особенности технологических механизмов. Это объясняется тем, что система привода и технологический механизм в совокупности образуют единый электромеханический комплекс со своими характеристиками и требованиями.

Управляемость - наиболее важная характеристика объекта, хотя и достаточно неопределенная на сегодняшний момент. В большинстве работ [3 -5] определение полной управляемости системы сводится к ее способности перехода из любого начального состояния в конечное при некотором управляющем воздействии в течение конечного интервала времени. Однако, это понятие до сих пор применяется только в отношении линейных стационарных систем в задачах финитного управления. Анализ существующих подходов показал, что в настоящий момент отсутствует математическое описание и критерии оценки управляемости ЭМС.

Управляемость системы электропривода, управляемость объекта по технологическому параметру, управляемость преобразователя, устройств защиты - это составляющие единого комплексного показателя - управляемости всего технологического комплекса. Устойчивость, показатели качества переходного процесса, регулирования скорости электропривода - частичные оценки того или иного объекта (процесса). Управляемость системы - показатель качества функционирования объекта более общего рода, позволяющий воспроизводить реакции на управляющие, возмущающие и задающие воздействия, изменяющиеся в процессе работы и возникающие как в нормальных (эксплуатационных), так и в нештатных (аварийных) ситуациях в системах электропривода и технологических механизмов. Такое толкование управляемости обуславливает поиск подходов, обеспечивающих математическую формализацию и оценку этого понятия.

В работах [8 -10] показано, что в основе оценки управляемости системы лежит анализ процессов энергопотребления в идеальной системе, т.е. при отсутствии наиболее характерных нелинейностей, и в системе с теми же параметрами при наличии характерных нелинейностей при одном и том же сигнале задания, состоящем из двух компонент - постоянной и знакопеременной составляющих: $U(t)=U_0+U_{km}\sin k\Omega t$, где U_0 - постоянная составляющая (нулевая гармоника); U_{km} - амплитудное значение напряжения k -й гармоники; $\Omega=2\pi f$ - угловая частота переменной составляющей напряжения. Использование аппарата мгновенной мощности позволяет исследовать энергопроцессы в электрических, механических и гидравлических звеньях ЭМС [11].

Модель электромеханического комплекса, включающая электропривод постоянного тока, технологический механизм, трубопроводную сеть с запорно-регулирующей арматурой, приведена на рис.1, где сплошными линиями показаны блоки идеальной (линейной) системы, пунктирными - вводимые нелинейности: в якорной цепи системы «нереверсивный преобразователь - двигатель» зависимость $R_{ин}(I_a(t))$ учитывает нелинейные свойства источника питания, зависящие, от направления тока, согласования характеристик выпрямительной и инверторной частей преобразовательного устройства; в цепи возбуждения зависимость $k\Phi(I_a)$ учитывает нелинейный характер изменения потока от тока возбуждения; в механическом контуре системы зависимость $M_d(\omega)$ отражает специфику работы технологического механизма.

Математический аппарат, описывающий модель ЭМС, а также выражения для вводимых нелинейностей, приведены в [10]. Параметры моделируемого электродвигателя: $P_n=75$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=340,9$ А; $n_n=1500$ об/мин. В результате исследований [9, 10] получено, что снижение управляемости сопровождается энергетическими процессами с высшими гармоническими в спектре мощности, амплитуду которых можно изменять управляющими и задающими воздействиями определенного вида.

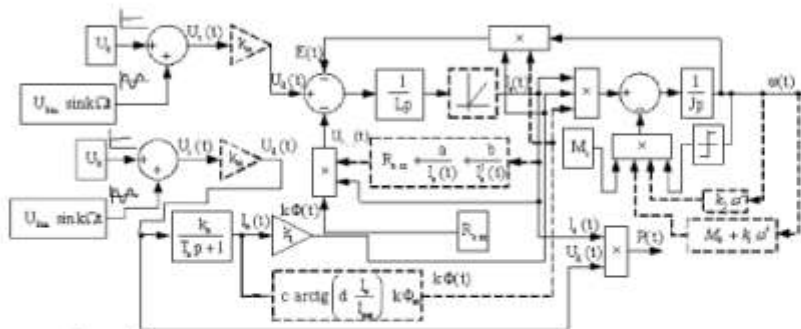


Рис. 1 Структурная схема модели электромеханического комплекса

Для количественной оценки управляемости ЭМС целесообразно ввести следующие показатели:

- энергетические - коэффициенты управляемости системы по мощности источника питания $k_{y,и}$, активной мощности $k_{y,а}$, тепловых потерь мощности $k_{y,т}$, гидравлической мощности $k_{y,г}$, механической мощности $k_{y,мех}$;
- электромеханические - коэффициенты управляемости электропривода (ЭП) по току $k_{y,т}$, скорости $k_{y,ω}$, моменту $k_{y,м}$;

- технологические – коэффициенты управляемости по подаче $k_{y,л}$, напору $k_{y,н}$.
Остановимся подробнее на некоторых из них.

Коэффициент управляемости системы по мощности источника питания имеет вид:

$$k_{y,л} = \frac{P_{э,ф}}{P_{э,л}}, \quad (1)$$

где $P_{э,ф}$, $P_{э,л}$ – эффективные значения мощности в фактической (нелинейной) и идеальной (линейной) системах, соответственно.

Эффективная мощность определяется выражением:

$$P_{э} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p^2(t) dt} = \sqrt{\left(\sum_{k=0}^{k(m=n)} P_{k0} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{ka}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{kb}^2}, \quad (2)$$

где $p(t)$ – сигнал мгновенной мощности; P_{k0} , P_{ka} , P_{kb} – постоянная составляющая и амплитуды переменных составляющих мгновенной мощности (косинусная и синусная составляющие).

Очевидно, если система полностью управляема, то коэффициент управляемости $k_{y,л}=1.0$; при неуправляемой системе – $k_{y,л}$ стремится к нулю. Коэффициент $k_{y,л}$ позволяет оценить изменение активной мощности в ЭМС:

$$k_{y,л} = \frac{P_{э,ф}}{P_{э,л}}, \quad (3)$$

где $P_{э,ф}$, $P_{э,л}$ – средние за период значения активной мощности в фактической и линейной системах соответственно;

$P_{э} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$, где $u(t)$, $i(t)$ – сигналы мгновенных значений напряжения и тока соответственно; T – период интегрирования.

Изменение тепловых потерь мощности отражает коэффициент:

$$k_{y,т} = \frac{P_{т,ф}}{P_{т,л}}, \quad (4)$$

где $P_{т,ф}$, $P_{т,л}$ – средние за период значения потерь мощности на активном сопротивлении в нелинейной и линейной системах соответственно; $P_{т} = \frac{1}{T} \int_0^T R_{я,л} \cdot i^2(t) dt$, где $R_{я,л}$ – сопротивление якорной цепи.

Зависимости энергетических показателей управляемости ЭМС с нелинейностью в силовом контуре электродвигателя для нагрузки вида $M_c = \text{const} = 0.5M_n$ от амплитуды переменной составляющей задающего полигармонического напряжения, приведены на рис. 2, 3. Анализ полученных кривых показал, что в области малых амплитудных значений переменной составляющей входного напряжения (сотые и десятые доли 1 В) нелинейные свойства зависимости $R_{я,л}(I_a(t))$ практически не проявляются; с ростом амплитуды переменной составляющей сигнала задания происходит интенсивное снижение коэффициента управляемости; увеличение частоты переменной составляющей полигармонического напряжения также приводит к уменьшению показателя $k_{y,л}$.

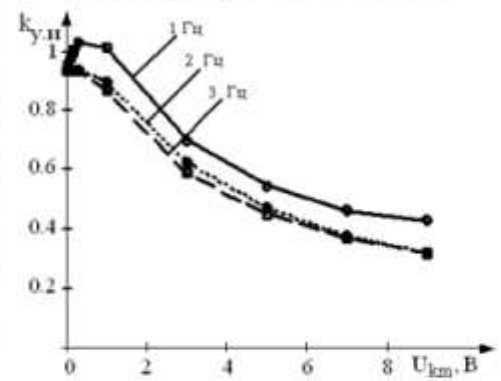
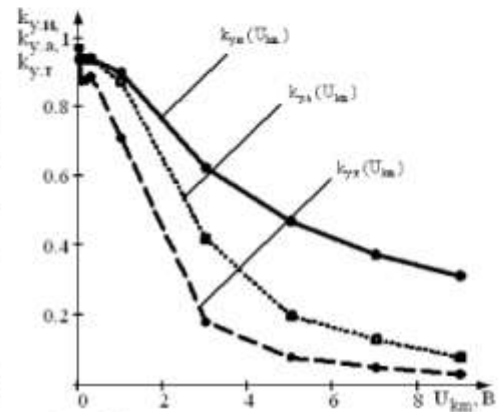
Коэффициент управляемости системы электропривода по скорости имеет вид:

$$k_{y,в} = \omega_{ср,ф} / \omega_{ср,л}, \quad (5)$$

где $\omega_{ср,ф}$, $\omega_{ср,л}$ – средние за период значения угловой скорости в фактической и линейной системах соответственно;

$\omega_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^T \omega(t) dt$, где $\omega(t)$ – сигнал мгновенной угловой скорости электродвигателя.

Аналогичным образом рассчитываются средние значения тока в якорной цепи, определяется электромеханический коэффициент управляемости системы по току. Кривые изменения электромеханических коэффициентов управляемости от амплитуды переменной составляющей полигармонического напряжения с угловой частотой



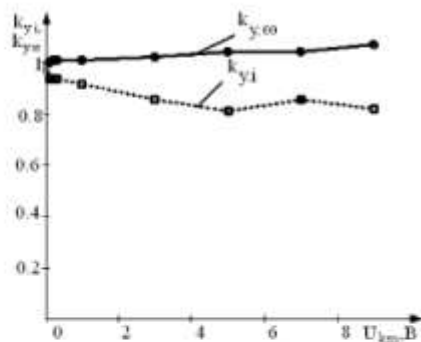


Рис. 4 Зависимости коэффициентов управляемости по току и скорости от амплитуды переменной составляющей задающего напряжения

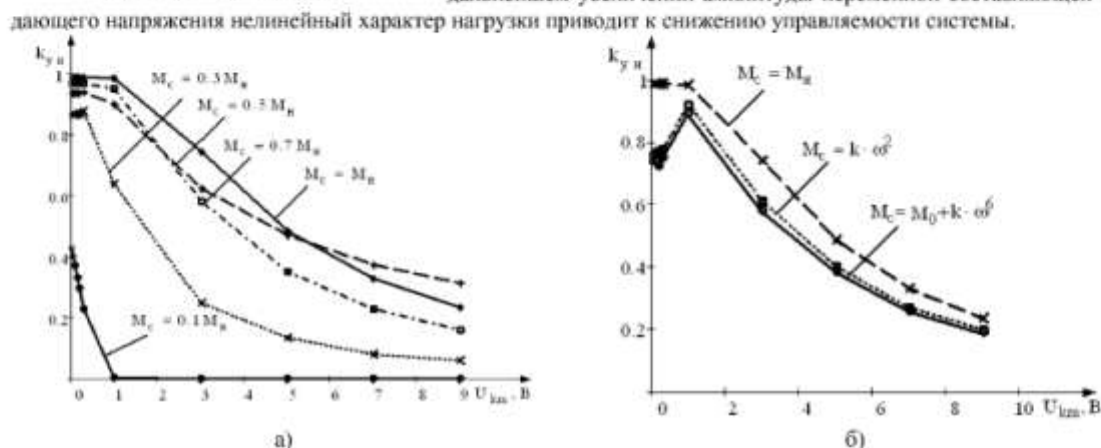


Рис. 5 Кривые изменения коэффициента управляемости от амплитуды переменной составляющей сигнала напряжения в ЭМС с $M_c = \text{const}$, а) и $M_c = f(\omega)$, б)

Таким образом, управляемость системы – это важный показатель качества функционирования объекта, учитывающий свойства и требования, как систем электропривода, так и технологических механизмов, позволяющий обеспечить экономичное и надежное реагирование ЭМС на управляющие, возмущающие и задающие воздействия, изменяющиеся в процессе работы и возникающие как в нормальных, так и в аварийных режимах работы. Исследование управляемости системы непосредственно связано с анализом процессов потребления (генерации) и преобразования энергии во всех звеньях электромеханического комплекса при задающем воздействии полигармонического характера. Для оценки управляемости объекта предложены количественные показатели на базе энергетических, электромеханических и технологических коэффициентов управляемости, отражающие влияние нелинейных свойств элементов, проявляющихся в тех или иных режимах, на качество функционирования всей электромеханической системы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360с. [2] Овищенко Г. Б., Юньков М. Г. Электропривод турбомеханизмов. – М.: «Энергия», 1972. – 240с. [3] Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. – М.: «Наука», 1971. – 743 с. [4] Каргу Л.И., Литвинов А.П., Майборода Л. А., Морозов В.В., Нелсин Р.А., Полонская Л.В., Пономарев В.М., Федоров С.М., Юсупов Р.М. Основы автоматического регулирования и управления. – М.: «Высшая школа», 1974. – 440 с. [5] Сю Д., Мебер А. Современная теория автоматического управления и ее применение. – М.: «Машиностроение», 1972. – 552 с. [6] Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 577с. [7] Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 772с. [8] Коренькова Т.В. Исследование управляемости электромеханической системы технологического комплекса / Научно-технический сборник КТУ: Розробка рудних родовищ. – Вип. 92. – Кривий Ріг: КТУ, 2008. – С.176-181. [9] Коренькова Т.В. Формалізація поняття управляемості в електромеханічних комплексах / Науково-прикладний ж-л: Проблеми сучасної електротехніки. Ч.1. – Київ: ІЕДНАНУ, 2008. – С.75-80. [10] Коренькова Т.В., Рожко В.Г. Концепція управляемості гідротранспортного комплексу / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 3/2008(50). Ч.2 – Кременчук: КДПУ, 2008. – С. 29-36. [11] Родькин Д.И., Заквасов В.В., Ромашин Ю.В. Преобразование мощности в источниках полигармонического питания / Вісник КДПУ: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 3/2004(26). – Кременчук: КДПУ, 2004. – С. 191 – 201.