Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCIV, 1982 г.

УДК 62-83 : 621.314.6

МЕТОДИКА НАЛАДКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПОМОЩЬЮ АНАЛОГОВОГО ИМИТАТОРА

А.С.СОЛОВЬЕВ, Н.А.АМБАРЦУМЯН,
В.В.ВОЗДВИЖЕНСКИЙ

Наладка электроприводов постоянного тока с подчиненным регулированием обычно выполняется в два этапа. На первом этапе производится наладка преобразовательных агрегатов: тиристорных преобразователей (ТП) или генераторов постоянного тока и их возбудителей. На этой же стадии может быть выполнена настройка регулятора в контуре регулирования напряжения, если такой контур предусмотрен в системе электропривода. Отличительная особенность этого этапа наладки заключается в том, что двигатель и механическая часть электропривода здесь не используются. Поэтому эту часть работы можно выполнять одновременно с монтажом, ревизией и наладкой механического оборудования производственных механизмов.

Результатом первого этапа является настройка систем управления ТП, возбудительных систем генераторов, контура регулирования напряжения. После настройки передаточная функция преобразователя (контура напряжения) обычно может быть описана уравнением

$$W_{пр}(p) = \frac{k_{пр}}{T_{пр}p + 1}, \qquad (1)$$

где $k_{пр}$, $T_{пр}$ – эквивалентные значения соответственно коэффициента передачи преобразователя или контура регулирования напряжения.

Второй этап наладочных работ включает настройку контуров тока, скорости, введение корректирующих связей для ограничения динамических нагрузок в механической части электропривода[x]. Второй этап работы требует полностью смонтированного и налаженного механического оборудования.

[x] Н.А.Амбарцумян. Синтез САУ электроприводов с упругими связями. – В кн.: Оптимизация режимов работы систем электроприводов. Красноярск, изд. Красноярского политехнического института, 1980.

Для сокращения времени наладочных работ и совмещения наладки механической и электрической частей производственных механизмов может быть применен имитатор, т.е. аналоговая модель двигателя и механической части машины. Модель-имитатор, в которую подается напряжение от силового преобразователя, воспроизводит электромеханические процессы в двигателе и трансмиссии. По параметрам модели могут быть настроены обратные связи по току, частоте вращения, упругому моменту M_{12}, а также выполнены настройка регуляторов тока и скорости и опробование натурной системы управления.

Модель-имитатор для электроприводов с блочным управлением рационально выполнять на основе блоков операционных усилителей того же типа, что и система управления электроприводом. Это облегчает согласование сигналов обратных связей, получаемых от моделей, с входами системы управления.

Обычно механическая часть производственных механизмов достаточно точно аппроксимируется двухмассовой электромеханической системой (ДЭМС), описываемой системой уравнений

$$\begin{aligned}
\frac{dI_a}{dt} &= \frac{1}{r_a T_a} E_{\text{пр}} - \frac{k_e}{r_a T_a}\omega_1 - \frac{1}{T_a} I_a ;\\
\frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{k_M}{J_1} I_a - \frac{1}{J_1} M_{12} ;\\
\frac{dM_{12}}{dt} &= c\omega_1 - c\omega_2 ;\\
\frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{1}{J_2} M_{12} - \frac{1}{J_2} M_c ,
\end{aligned} \qquad (2)$$

где $E_{\text{пр}}$ - э.д.с. преобразователя; r_a, I_a, T_a - ток, сопротивление и постоянная времени якорной цепи двигателя; k_e, k_M - коэффициенты э.д.с. и момента двигателя; J_1, J_2 - приведенные моменты инерции масс соответственно до и после упругого элемента (УЭ); ω_1, ω_2 - частоты вращения масс J_1 и J_2; M_c - приведенный момент сопротивления; c - приведенная жесткость УЭ.

При выборе масштабов моделирования уравнений (2) необходимо иметь в виду, что модель-имитатор работает совместно с натурным преобразователем и его системой управления. Поэтому масштабы моделирования времени и напряжения регуляторов должны быть единичными, т.е. m_t = I с/с; $m_{U\,\text{рег}}$ = = I В/В.

Остальные масштабы целесообразно выбрать так, чтобы регуляторы, построенные с помощью модели, не требовали перестройки при переходе к натуре. Для выполнения этого условия целесообразно выбрать масштабы следующим образом:

$$\begin{aligned}
m_\omega &= k_c ;\\
m_I &= k_T ;\\
m_M &= k_y ;\\
m_U &= k_c k_e^{-1} ,
\end{aligned} \qquad (3)$$

где m_ω, m_I, m_M, m_U – масштабы моделирования частот вращения, тока, момента в УЭ, напряжения преобразователя; $k_с$, $k_т$, $k_у$ – коэффициенты передачи датчиков частоты вращения (ДС), тока (ДТ), упругого момента (Д); для выявления момента в УЭ рационально использовать косвенные методы [x].

Сигнал напряжения преобразователя подается на имитатор через датчик напряжения (ДН), поэтому для соблюдения выбранного масштаба моделирования напряжения между ДН и моделью необходим согласующий усилитель с коэффициентом передачи

$$k_{согл} = m_U k_н^{-1} = k_с (k_e k_н)^{-1}, \qquad (4)$$

где $k_н$ – коэффициент передачи ДН.

Для модели коэффициент передачи преобразователя

$$\bar{k}_{пр} = k_{пр} k_н k_{согл} \qquad (5)$$

или, с учетом формулы (4),

$$\bar{k}_{пр} = k_{пр} k_с k_e^{-1}. \qquad (6)$$

При наборе динамических свойств ДЭМС на модели-имитаторе могут быть использованы уравнения (2), в которых переменные координаты I_a, $E_{пр}$, ω_1, ω_2, M_{12} заменены их аналоговыми изображениями, а постоянные параметры пересчитаны к модели. При пересчете учитываются масштабы моделирования и выражения (3) для этих масштабов. Тогда формулы пересчета натурных параметров в „модельные" будут следующие:

$$\bar{r}_a = r_a k_с (k_e k_т)^{-1}; \qquad (7)$$

$$\bar{k}_e = 1; \qquad (8)$$

$$\bar{k}_M = k_M k_у k_т^{-1}; \qquad (9)$$

$$\bar{J}_i = J_i k_у k_с^{-1}, \quad i = 1, 2; \qquad (10)$$

$$\bar{c} = c k_у k_с^{-1}. \qquad (11)$$

Черта над буквенным обозначением соответствует параметру, пересчитанному к модели.

Модель-имитатор работает в реальном времени, поэтому величины постоянных времени T_a, $T_{пр}$ остаются неизменными. Не меняется и собственная частота колебаний двухмассовой системы

---

[x] Косвенные методы контроля трудноизмеряемых координат электроприводов с упругими связями / В.В.Рудаков, А.С.Соловьев, В.А.Дартау, Н.А.Амбарцумян. – Электротехническая промышленность, серия „Электропривод", 1980, вып.3 (80).

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c(J_1+J_2)}{J_1 J_2}}, \qquad (12)$$

в чем легко убедиться, подставив в формулу (12) выражения (10)-(11).
В модели коэффициенты передачи датчиков обращаются в единицы. Действительно, для ДС

$$\bar{k}_c = k_c m_{U_{рег}} m_\omega^{-1}. \qquad (13)$$

Однако с учетом выбранных масштабов

$$\bar{k}_c = 1. \qquad (14)$$

Аналогично можно показать, что

$$\bar{k}_т = \bar{k}_у = 1, \qquad (15)$$

т.е. сигналы обратных связей можно подавать в систему управления электроприводом непосредственно от модели.

При указанной выше настройке модели передаточные функции регуляторов тока

$$W_{рт}(p) = \frac{(T_a p+1) r_a}{2 T_{пр} k_{пр} k_т p} \qquad (16)$$

и скорости

$$W_{рс}(p) = \frac{J k_т}{4 T_{пр} k_M k_c} \qquad (17)$$

остаются неизменными при вычислении, исходя из натурных и „модельных" параметров, в чем нетрудно убедиться, подставив в формулу (16) выражения (5), (7), (15), а в формулу (17) - уравнения (9), (10), (14), (15).

Исследование электропривода подчиненного регулирования с моделью-имитатором проводилось на преобразовательном агрегате с экскаваторным генератором типа ПЭ-250-1500 (250 кВт, 460 В, 1500 об/мин) по схеме на рис. 1. Тиристорный возбудитель (ТВ) обладал 10-кратным запасом по напряжению на обмотках возбуждения генератора (ОВГ), что обеспечивало высокий уровень быстродействия регулирования напряжения. При использовании ПИ-регулятора напряжения (РН) контур напряжения был настроен на технический оптимум и имел передаточную функцию

$$W_{пр}(p) = \frac{10,4}{0,02p+1}. \qquad (18)$$

Совместно с натурным генератором работала модель экскаваторного электропривода со следующими параметрами: двигатель ДПЭ-72 (100 кВт; 305 В; 750 об/мин; k_e = 3,95 В·с/рад, $k_м$ = 3,95 Н·м/А, r_a = 0,051 Ом, T_a = 0,1 с).

Сопротивление и постоянная времени указаны для всей якорной цепи электропривода. Параметры механической части: J_1 = 66 кг·м^2; J_2 = = 25 кг·м^2; c = 1200 Н·м/рад.

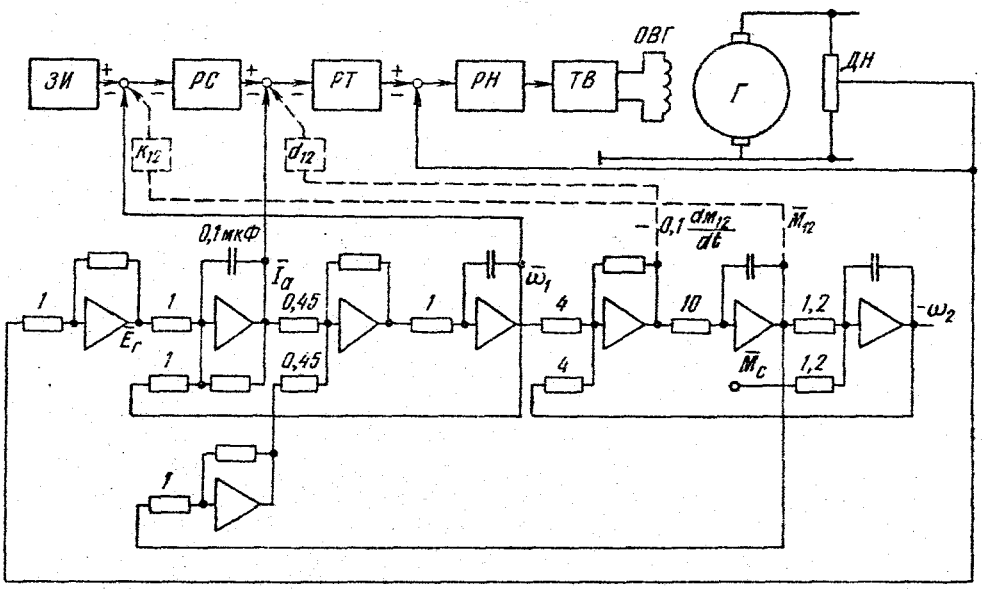


Рис.1. Схема установки с моделью-имитатором

Модель-имитатор и система управления электроприводом построены на операционных усилителях аналоговой машины МН-7. Значения коэффициентов передачи датчиков: k_c = 0,38 В·с/рад; $k_т$ = 0,05 В/А; $k_у$ = 0,0126 В/(Н·м); масштабы моделирования: m_ω = 0,38 В·с/рад; m_I = 0,05 В/А; m_M = = 0,0126 В/(Н·м); m_U = 0,096 В/В. Согласно формулам (4) и (6)-(11) $k_{согл}$ = = 1; $k_{пр}$ = 1; r_a = 0,1; k_e = 1; $k_м$ = 1; J_1 = 2,19; J_2 = 0,835; c = = 40.

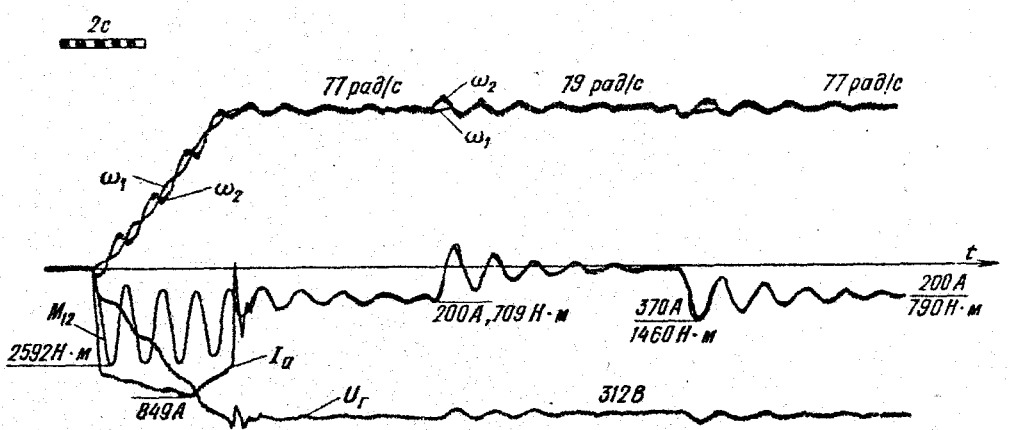


Рис.2. Осциллограммы рабочих режимов электропривода с подчиненным регулированием

Передаточная функция регулятора тока (РТ на рис.I) определена по формуле (I6):

$$W_{РТ}(p) = 0{,}25 + 2{,}5p^{-1}, \qquad (I9)$$

а коэффициент передачи П-регулятора скорости (РС) согласно формуле (I7) равен 40.

На рис.2 приведены осциллограммы рабочих режимов пуска, сброса и наброса нагрузки в электроприводе с подчиненным регулированием, электромеханическая часть которого воспроизведена на модели-имитаторе (см. рис.I).

Кривая напряжения генератора $U_г$ снята с натурного генератора ГПЭ-250-I500, а кривые тока I_a, частот вращения ω_1, ω_2 и упругого момента M_{12} – с модели-имитатора. На осциллограмме отчетливо видны колебания частот вращения, токов и упругого момента ДЭМС.

На установке, собранной по схеме рис.I, отрабатывались системы с коррекцией динамики ДЭМС. Согласно рекомендациям[x], коэффициент передачи РС был принят равным 36, а на вход РС введена дополнительная обратная связь по упругому моменту с коэффициентом $k_{12} = 0{,}I55$. Кроме того, на вход РТ введена дополнительная обратная связь по производной упругого момента с коэффициентом $d_{12} = 0{,}2$. В модели-имитаторе выделяется сигнал, соответствующий $0{,}I\, dM_{12}/dt$, поэтому принято $d_{12} = 2$. Дополнительные

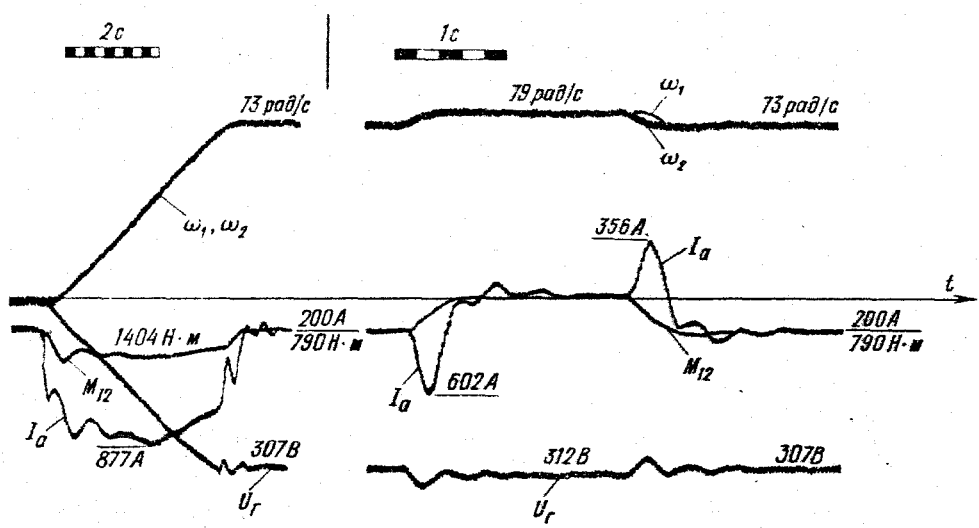


Рис.3. Осциллограмма рабочих режимов электропривода с коррекцией динамики электромеханической системы

[x] Н.А.Амбарцумян. Синтез САУ электроприводов с упругими связями.

обратные связи показаны на рис.I пунктиром. Введение обратной связи на вход РТ обеспечивает ее влияние на динамику привода и при больших нагрузках, когда РС входит в зону ограничения.

Осциллограммы рабочих режимов пуска, сброса и наброса нагрузки при коррекции динамики ДПС, снятые на установке с имитатором, приведены на рис.3. Введение дополнительных обратных связей позволяет существенно уменьшить колебания частот вращения, тока и упругого момента по сравнению с обычной системой подчиненного регулирования (см. рис.2).

Приведенные осциллограммы показывают, что модель-имитатор позволяет достаточно точно воспроизводить режимы работы электроприводов, не требуя обязательного использования механической части машин. Это позволяет не только сократить время испытаний и наладок, но и воспроизводить на имитаторе аварийные режимы, выполнение которых на реальной установке связано с риском вывода ее из строя.

Аналоговый имитатор можно выполнить в виде переносного блочного комплекта, сопрягаемого с преобразователем электропривода на время испытаний. Перестройка передаточных функций операционных усилителей, составляющих имитатор, несложна, что позволяет применять ее для электроприводов различных производственных механизмов. Для удобства имитатора он может быть снабжен наборным полем, как это сделано в аналоговых вычислительных машинах.