УДК 518.12:62-83:622.243.56

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ИНДУКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МУФТОЙ, ВКЛЮЧАЮЩЕМ ЗВЕНО С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

МАМЕДОВ А.И., АЛИЕВ Я.А.

Азербайджанский Научно – Исследовательский Институт Энергетики и энергетического проектирования

Представлен численный метод расчета переходных процессов в асинхронном электроприводе с ЭМС, включающем звено с распределенными параметрами. Получены алгоритмы, удобные для проведения расчетов на компьютере

В настоящее время одним из средств повышения надежности работы бурового электропривода является применение оперативных электромагнитных муфт [1]. Буровые электроприводы с индукционной электромагнитной муфтой (ИЭМ) имеют высокую эксплуатационную надежность, обеспечивают плавный пуск, сглаживают пульсацию нагрузочного момента, что положительно отражается на сроке службы бурильных труб и элементов всей кинематической цепи.

Особенностью динамических свойств бурового электропривода при роторном бурении связано с тем, что его механическая часть – колонна бурильных труб является объектом с распределенными параметрами [2-5].

В связи с этим, в настоящее время в условиях широкого внедрения компьютерной техники в практике инженерных расчетов, вопросы создания численных методов расчета переходных процессов в буровых электроприводах с распределенными параметрами с ИЭМ представляет большой теоретический и практический интерес.

Вопросам расчета переходных процессов в электроприводах с ЭМС при сосредоточенных параметрах объекта посвящен ряд работ. Однако исследование динамических показателей буровых электроприводов с учетом распределенности параметров системы, влияние которых с увеличением глубин скважин становится все более значительным, является весьма важной задачей в решении проблемы надежности работы оборудования.

В работах [2,3] для решения проблемы динамики в электроприводах с распределенными параметрами представлены методы, позволяющие привести такие системы к импульсным системам.

Один из эффективных численных методов расчета переходных процессов в системах с распределенными параметрами является численный метод, основанный на использовании дискретного аналога интегрального уравнения свертки [4-6].

Преимуществом указанного численного метода является то, что он позволяет найти переходные процессы в системе с распределенными параметрами без перехода в область дискретных изображений, а также осуществлять переход от Лапласовых изображений нескольких функций в область оригиналов без нахождения корней характеристического уравнения, что значительно упрощает математические выкладки и расширяет круг решаемых практических задач.

В данной статье дается дальнейшее обобщение и развитие указанного численного метода [4-6] для расчета переходных процессов в асинхронном электроприводе с ИЭМ, включающем в качестве нагрузки звено с распределенными параметрами – колонну бурильных труб. Задача рассматривается для случая, когда потери в колонне бурильных труб не учитываются и угловые скорости вращения электродвигателя и ведомой части ИЭМ имеют начальные значения $\omega_{Энач}$ и $\omega_{Мнач}$ соответственно.

Влиянием электромагнитных переходных процессов в приводном двигателе и ИЭМ пренебрегаем, поскольку время протекания переходных электромагнитных процессов в двигателе с ИЭМ несоизмеримо мало по сравнению с общим временем переходного процесса всей системы [7].

Исходными уравнениями для данной системы будут:

$$I_Э \frac{d\varpi_Э}{dt} = M_Э - M_М \tag{1}$$

$$I_М \frac{d\varpi_М}{dt} = M_М - M_С \tag{2}$$

где $M_Э$, $M_М$, $M_С$ – вращающий момент электродвигателя, передаваемый момент ИЭМ и момент сопротивления нагрузки соответственно, приведенные на роторный стол; $I_Э$ – сумма моментов инерции ротора электродвигателя и ведущей части ИЭМ; $I_М$ – сумма моментов инерции ведомой части ИЭМ и вращающихся частей оборудования роторного стола, приведенные к роторному столу; $\omega_Э$, $\omega_М$ – текущие угловые скорости вращения ротора электродвигателя и ведомой части ИЭМ, приведенные к роторному столу.

Принимая изменение движущего момента двигателя в рабочей части механической характеристики линейным, получим

$$M_Э = a_1 - b_1\omega_э, \tag{3}$$

где a_1, b_1 – параметры линеаризации механической характеристики двигателя.

Выражение для передаваемого момента ИЭМ, согласно [4], будет

$$M_М(t) = M_П(t) - b_2\omega_М(t),$$

где $M_П(t)$ – пусковой момент ИЭМ. В общем случае пусковой момент ИЭМ зависит как от тока возбуждения, так и от угловой скорости ведущей части муфты, т. е. угловой скорости вращения электродвигателя. В данном случае угловые скорости вращения электродвигателя и ИЭМ до начала переходного процесса имеют значения $\omega_{Э.нач}$, $\omega_{М.нач}$ и, как показывают электромагнитные расчеты муфты, небольшие изменения угловой скорости ведущей части ИЭМ не оказывают значительного влияния на значение пускового момента $M_П(t)$. Отсюда, согласно [4], выражение для пускового момента ИЭМ имеет следующий вид

$$M_М(t) = Ci_b(t),$$

здесь С- постоянный коэффициент. В выражении пускового момента ИЭМ ток возбуждения изменяется по инерционному закону. Однако, для данной системы постоянная времени обмотки возбуждения муфты несоизмеримо мала с общим временем электромеханической постоянной времени всей системы, что позволяет принимать изменения тока возбуждения муфты в скачкообразном виде, т.е. $i_b = const$.

В этой связи выражение пускового момента муфты можно представить в виде

$$M_П(t) = a_2 = const,$$

где $a_2 = C_{ib}$ – постоянный коэффициент.

Тогда выражение для передаваемого момента муфты

$$M_М = a_2 - b_2\omega_М \ , \tag{4}$$

где a_2, b_2 – параметры линеаризации механической характеристики ИЭМ.

Переходные процессы, протекающие в колонне бурильных труб как объекта с распределенными параметрами при крутильных колебаниях без учета трения между колонной труб и глинистым раствором, описываются волновыми уравнениями [2-5]:

$$-\frac{\partial\varpi}{\partial x} = k_1 \frac{\partial M}{\partial t},$$

$$-\frac{\partial M}{\partial x}=k_2\frac{\partial \varpi}{\partial t}, \qquad 0\le x\le \ell \tag{5}$$

где ω = ω(x, t), M = M(x, t) – изменение угловой скорости и крутящего момента любой точки колонны труб в произвольный момент времени; k_1 – коэффициент упругости ; k_2 – момент инерции; ℓ - длина колонны бурильных труб.

Начальные условия:

$\omega(x,t)_{t=0}=0$, $M(x,t)_{t=0}=0$

Граничные условия имеют вид:

$\omega(x,t)_{x=0}=\omega_M(t)$, $\omega(x,t)_{x=\ell}=\mu M(x,t)_{x=\ell}$

где μ - коэффициент, определяющий связь между угловой скоростью ω(x, t) и моментом кручения M(x,t) в конечной точке звена с распределенными параметрами.

Выражение (1) с учетом (3) и (4) в операторной форме можно представить в виде:

$$\omega_э(p)=(\frac{a_1}{p}+I_Э\omega_{энач})k_1(p)-k_1(p)(\frac{a_2}{p}-b_2\omega_M(p)), \tag{6}$$

где $k_1(p)=\dfrac{1}{I_э p+b_1}$ – передаточная функция; p- оператор преобразования Лапласа; $\omega_э(p)$, $\omega_M(p)$- Лапласово изображение функции $\omega_э(t)$, $\omega_M(t)$.

На основании теоремы свертки [4] переходя от уравнения (6) относительно изображений к уравнению относительно оригиналов, получим:

$$\omega_э(t)=\frac{a_1-a_2}{b_1}\left(1-k_1^/(t)\right)+\omega_{энач}k_1^/(t)+\frac{b_2}{Iэ}\int_0^t k_1^/(\theta)\omega_M(t-\theta)d\theta, \tag{7}$$

где $k_1^/(t)=e^{-\frac{b_1}{I_э}t}$

В уравнении (7) входит неизвестная функция $\omega_M(t)$. Ее значение определяется следующим образом.

Выражение (2) с учетом (3) в операторной форме можно представить в виде:

где $M_C(p)$ - Лапласово изображение момента нагрузки $M_C(t)$.

$$\left(I_M P+b_2\right)\omega_M(p)=\frac{a_2}{p}+I_M\omega_{Mнач}-M_c(p) \tag{8}$$

Переходя от уравнения (8) в область оригиналов, получим:

$$\omega_M(t)=\frac{a_2}{b_2}\left(1-k_2^/(t)\right)+\varpi_{Mнач}k_2^/(t)-\frac{1}{I_M}\int_0^t k_2^/(\theta)M_c(t-\theta)d\theta, \tag{9}$$

где

$$k_2^/(t)=e^{-\frac{b_2}{I_M}t}$$

В выражение (9) входит неизвестная функция $M_C(t)$. Ее значение определяется по следующей методике. При принятых начальных и граничных условиях из решения системы дифференциальных уравнений (1) для момента $M_C(t)=M_H(t)$ можно представить следующее выражение в операторной форме:

$$M_C(p)=\frac{1}{\rho}\frac{ch\gamma\ell+\frac{\mu}{\rho}sh\gamma\ell}{sh\gamma\ell+\frac{\mu}{\rho}ch\gamma\ell}\omega_M(p), \tag{10}$$

где $\gamma = p\sqrt{k_1 k_2} = \dfrac{p}{\sigma}$ - коэффициент распространения волны. $\rho = \sqrt{\dfrac{k_1}{k_2}}$ - волновое сопротивление.

Выражение (10) можно представить в виде:

$$M_C(p)[\frac{1}{p} - e^{\varphi}k_1(p)] = \frac{1}{\rho}[\frac{1}{p} + e^{\varphi}k_1(p)]\omega_M(p), \qquad (11)$$

где

$$k_1(p) = \frac{1}{p}e^{-\frac{2l}{c}p}, \qquad e^{\varphi} = \frac{\rho - \mu}{\rho + \mu}$$

При свободном конце колонны труб e^{φ} =-1. Для защемленного конца колонны труб e^{φ} =1.

Переходя от уравнения (11) в область оригиналов, получим:

$$\int_0^t M_H(t-\theta)1(\theta)d\theta - e^{\varphi}\int_{\frac{2l}{\sigma}}^t M(t-\eta)k_1(\eta)d\eta = \frac{1}{\rho}\int_0^t 1(\theta)\omega_M(t-\theta)d\theta + \frac{e^{\varphi}}{\rho}\int_{\frac{2l}{\sigma}}^t k_1(\theta)\omega_M(t-\theta)d\theta \qquad (12)$$

Интегральные уравнения (7), (9), (10) могут быть решены численно, если заменить интегралы суммами.

В связи с этим, используя связь между непрерывным временем t и дискретным n в виде t = nT / λ [2-5] (где λ - любое целое число; T = 2τ, τ = ι / σ -время пробега волны в один конец длинного вала; n = 0, 1, 2,……,), производим дискретизацию уравнений (7), (9), (10), при выбранном интервале T/λ, заменяя операцию непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулой прямоугольников.

При этом, вместо (7), (9), (10), получаем следующие выражения в решетчатой форме:

$$\omega_э(n) = \frac{a_1 - a_2}{b_1}\left(1 - k_1^{/}(n)\right) + \omega_{энач}k_1^{/}(n) + \frac{b_2}{Iэ}\frac{T}{\lambda}\sum_{m=0}^{n} k_1{}^1[m]\omega\ [n-m], \qquad (13)$$

где $k_1{}^1[n] = e^{-\alpha_1 n}$, $\alpha_1 = \dfrac{Tb_1}{\lambda I_Э}$.

$$\omega_M(n) = \frac{a_2}{b_2}\left(1 - k_2^{/}(n)\right) + \varpi_{Мнач}k_2^{/}(n) - \frac{T}{\lambda I_M}\sum_{m=0}^{n} k_2{}^1[m]M_C[n-m], \qquad (14)$$

где $k_2{}^1[n] = e^{-\alpha_2 n}$, $\alpha_2 = \dfrac{Tb_2}{\lambda I_M}$.

$$M_C[n] = \frac{1}{\rho}\left(\sum_{m=0}^{n} 1[m] + e^{\varphi}\sum_{m=\lambda}^{n} 1[m-\lambda]\right)\omega_M[n-m] + e^{\varphi}\sum_{m=\lambda}^{n} 1[m-\lambda]M_C[n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} 1[n-m]M_C[m] \qquad (15)$$

Здесь
$$\sum_{m=0}^{n} k_1{}^1[m]\omega_M[n] = \omega_M[n] + \sum_{m=1}^{n} k_1{}^1[m]\omega_M[n-m] \qquad (16)$$

$$\sum_{m=0}^{n} k_2{}^1[m]M_C[n-m] = M_C[n] + \sum_{m=1}^{n} k_2{}^1[m]M_C[n-m] \qquad (17)$$

$$\sum_{m=0}^{n} 1[m]\omega_M[n-m] = \omega_M[n] + \sum_{m=1}^{n} 1[m]\omega_M[n-m] \tag{18}$$

Выражения (11)-(13) с учетом (14)-(16) будут:

$$\omega_э(n) = \frac{a_1 - a_2}{b_1}\left(1 - k_1^{/}(n)\right) + \omega_{энач} k_1^{/}(n) + \frac{b_2}{Iэ}\frac{T}{\lambda}\omega_M[n] + \frac{b_2}{I_Э}\frac{T}{\lambda}\sum_{m=1}^{n} k_1{}^{1}[m]\omega_M[n-m], \tag{19}$$

$$\omega_M(n) = \frac{a_2}{b_2}\left(1 - k_2^{/}(n)\right) + \varpi_{Mнач} k_2^{/}(n) - \frac{T}{\lambda I_M} M_C[n] - \frac{T}{\lambda I_M}\sum_{m=1}^{n} k_2{}^{1}[m] M_C[n-m], \tag{20}$$

$$M_C[n] = \frac{1}{\rho}\omega_M[n] + \frac{1}{\rho}\left(\sum_{m=1}^{n} 1[m] + e^{\varphi}\sum_{m=\lambda}^{n} 1[m-\lambda]\right)\omega_M[n-m] +$$
$$+ e^{\varphi}\sum_{m=\lambda}^{n} 1[m-\lambda] M_C[n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} 1[n-m] M_C[m] \tag{21}$$

Погрешность расчетов связана с величиной λ. Чем больше выбрано число λ, тем в меньшей мере характеристики непрерывной функции отличаются от соответствующих характеристик решетчатых.

Таким образом, при подстановке в выражение (20) значения решетчатой функции $M_C[n]$ из (21) определяем значение решетчатой функции $\omega_M[n]$.

При известном значении решетчатой функции $\omega_M[n]$ осуществляется переход к нахождению значения решетчатой функции $\omega_Э[n]$ из (19).

На основе полученных соотношений был произведен численный расчет переходного процесса в системе бурового электропривода с ИЭМ, включающей колонну бурильных труб длиной 2000 м без нагрузки на конце. Параметры системы приняты следующие:

a_1=3122кг.м, b_1 = 164,8 кг.м.с, a_2 = 1705,2 кг.м,

b_2 = 90 кг.м.с, $I_Э$ = 6,57 кг.м.с^2, I_M = 168,2 кг.м.с^2, $\omega_{Энач}$ = 18,68 рад/с, $\omega_{Мнач}$ = 17,8 рад/с, τ = 0,4с, ρ =0,019 1/ кг.м.с

Расчеты проведены при двух значения λ (λ = 10, λ = 20) Как показывает проведенный анализ, максимальная погрешность расчетов при λ = 10, по сравнению с λ = 20, не превышает 1,5 %.

Расчеты показывают, что в данном случае с введением в электропривод ИЭМ колебания переходных процессов (пульсации нагрузки) уменьшаются до 10 %.

---

1. *Манкин В. М.* и др. Направление электроприводов буровых установок с применением индукционных электромагнитных муфт и тормозов. «Автоматизированный электропривод в промышленности». Труды VI Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу. М. «Энергия», 1974г.
2. *Кадымов Я.Б.* Переходные процессы в системах с распределенными параметрами. М. «Наука», 1968г.
3. *Кадымов Я. Б., Листенгартен Б. А., Мамедов А. И.* Численный метод расчета переходных процессов в неоднородных системах с распределенными параметрами. Изв. ВУЗов, «Электромеханика», 1979, №6.
4. *Алиев Я. А.* Численное определение переходных процессов в колонне бурильных труб как объекта с распределенными параметрами. Проблемы энергетики, 2004, №3
5. *Алиев Я. А.* Численный метод расчета переходных процессов в электроприводе бурения нефтяных скважин. Проблемы энергетики, 2004, №2.

6. *Мамедов А. И., Алиев Я. А.*. К анализу переходных процессов в системах с сосредоточенными параметрами дискретными методами. Проблемы энергетики, 2004, №4
7. *Соколов М. М.* И др. Исследование переходных процессов асинхронного электропривода роторного стола. Сб. «Электротехническая промышленность». Сер. «Электропривод». Информэлектро, 1976, вып.8.
8. *Казарян В. Н.* Автоматическое регулирование скорости привода с электромагнитной муфтой скольжения. Электротехника, 1968, №8

İNDUKSİYON ELEKTROMAQNİT MUFTASI İLƏ TƏQHİZ EDİLMİŞ PAYLANMIŞ PARAMETRLİ ASİNXRON ELEKTRİK İNTİQALINDA BAŞ VERƏN KEÇİD PROSESLƏRİNİN HESABLANMASI ÜÇÜN ƏDƏDİ ÜSUL

MƏMMƏDOV A. İ., ƏLİYEV Y. A.

Məqalədə induksiyon elektromaqnit muftası ilə təqhiz edilmiş paylanmış parametrli asinxron elektrik intiqalında baş verən keçid proseslərinin hesablanması üçün ədədi üsul təklif edilmişdir.

THE NUMERICAL METHOD OF CALCULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH INDUCTION ELECTROMAGNETIC MUFT INCLUDING THE PART WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS

MAMEDOV A. I, ALIYEV Y. A.

The numerical method of calculation of transient processes in the asynchronous electric drive with induction electromagnetic muft including the part with the distributed parameters is offered here.