

УДК 62-83:622(075)

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СТАНКА-КАЧАЛКИ

© 2010 О.Б. Сигова

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 17.11.2010

В данной статье рассмотрены вопросы разработки оптимальной системы управления скоростью электропривода станка-качалки при действии случайных возмущений тока нагрузки. Разработаны математические модели системы управления асинхронным электродвигателем с учетом случайного характера возмущающих воздействий. Внутренние контуры регулирования настраиваются на технический оптимум, а применительно к контуру регулирования скорости разработана методика синтеза оптимального регулятора.

Ключевые слова: *станок-качалка, электропривод, оптимальное управление*

В настоящее время на нефтедобывающей территории России насчитывается более 100 тысяч станков-качалок, предназначенных для подъема пластовой жидкости из скважин, с электроприводами мощностью до 45 кВт. Повышение их работоспособности является ключевой задачей для снижения себестоимости добываемой нефти. Условия эксплуатации станков-качалок требуют применения регулируемого привода, а применяемые электроприводы переменного тока не позволяют регулировать частоту вращения электродвигателя. Основной причиной работы асинхронных электроприводов с низким коэффициентом использования является «тяжелый пуск» станков-качалок, при котором требуемый пусковой вращающий момент электродвигателя в 5-6 раз превышает вращающий момент при установленном режиме. Нагрузка двигателей не превышает 40%, двигатель работает с низким значением КПД и коэффициента мощности, что приводит к повышенному расходу электроэнергии и необходимости увеличивать поперечное сечение проводов питающей сети и мощность трансформаторной подстанции.

Асинхронный электродвигатель является двухмерным объектом управления. При построении автоматизированных электроприводов переменного тока проводят компенсацию нелинейных перекрестных связей объекта, и синтез систем управления проводится раздельно для каналов регулирования. Система векторного управления асинхронным электроприводом рассчитывается аналогично системе

управления электроприводом постоянного тока. Получаемые в результате настроек внутренних контуров регулирования на технический оптимум [1, 2] передаточные функции регуляторов являются «стандартными»: для контуров регулирования тока и потокосцепления – пропорционально-интегральный регулятор, а для контура регулирования момента – интегральный регулятор.

Электропривод станка-качалки функционирует при наличии большого количества возмущений, оказывающих отрицательное влияние на работу оборудования. Эти возмущения связаны с изменением физико-химических свойств перекачиваемой пластовой жидкости, статической нагрузкой, создаваемой весом столба жидкости над плунжером, весом штанг и силами трения и проявляются в виде изменения тока (момента) нагрузки электропривода. Случайные изменения нагрузки приводят к возникновению механических нагрузок на насосное и электрическое оборудование, механическим ударам в системе, ступенчатому изменению числа качаний, увеличению значений пусковых токов и износу оборудования [1]. Поэтому при разработке системы управления электроприводом станка-качалки необходимо учитывать случайный характер возмущающих воздействий и использовать методы оптимального управления. Одним из центральных вопросов синтеза систем управления является обоснование критерия качества управления [3-5]. Системы автоматического регулирования скорости и расхода, функционирующие при действии случайных возмущений, заданных вероятностными или статистическими характеристиками, могут быть описаны выражениями следующего вида

Сигова Ольга Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».
E-mail: o_sigova@mail.ru

$$A_{\omega}(p) \cdot \omega = B_{\omega}(p) \cdot U_{\omega} + I_H(t), \quad (1)$$

$$A_Q(p) \cdot Q = B_Q(p) \cdot U_Q + \omega_Q(t), \quad (2)$$

где $I_H(t)$ – случайное изменение тока нагрузки электропривода в системе стабилизации скорости, $\omega_Q(t)$ – случайное изменение скорости электропривода в системе стабилизации расхода насоса, ω, Q – регулируемые координаты электропривода, $A_{\omega}(p), B_{\omega}(p), A_Q(p), B_Q(p)$ – операторные полиномы.

Так как значения случайных процессов $I_H(t)$ и $\omega(t)$ распределены по нормальному закону, то регулируемые координаты ω, Q также будут случайными процессами, распределенными по нормальному закону [1, 3, 6]. Тогда системы автоматического регулирования скорости электропривода и расхода насоса станка-качалки должны обеспечивать малые отклонения скорости и расхода от желаемых значений. Для этого необходимо минимизировать средние квадраты (дисперсии) отклонений скорости и расхода при случайных изменениях нагрузки или минимизировать среднеквадратические критерии качества управления:

$$\langle \omega^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \omega^2(t) dt, \quad (3)$$

$$\langle Q^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T Q^2(t) dt, \quad (4)$$

где $\langle \omega^2 \rangle, \langle Q^2 \rangle$ – средние квадраты отклонения скорости электропривода и расхода насоса станка-качалки.

Необходимо учитывать, что один среднеквадратический критерий не отражает всех требований к системам управления. Реальные системы должны удовлетворять комплексу дополнительных требований, таких, как сохранение устойчивости при неизбежных вариациях параметров, реализация регуляторов без «идеальных» дифференцирующих звеньев и др. Учет дополнительных требований приводит к снижению предельных возможностей управления, и нужно стремиться к тому, чтобы эта потеря была минимальной.

Задача синтеза оптимальной системы управления приобретает смысл лишь при учете ограничений на управляющее воздействие. При бесконечной мощности управляющего воздействия можно обеспечить нулевую ошибку стабилизации. Для систем управления электроприводами ограничения обычно накладываются на модуль управляющего воздействия

$$U_{\min} \leq U(t) \leq U_{\max}, \quad (5)$$

что делает задачу оптимального управления нелинейной. В этом случае целесообразно перейти от ограничений на модуль управляющего воздействия к ограничениям на средний квадрат (мощность) управляющего воздействия

$$\langle U^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U^2(t) dt \leq N_U \quad (6)$$

Ограничение (6) учитывается согласно правилам решения изопериметрических задач вариационного исчисления путем дополнения функционалов (3), (4) мощностью управляющих воздействий

$$J = \lambda \langle \omega^2 \rangle + \langle U^2 \rangle, \quad (7)$$

$$J = \lambda \langle Q^2 \rangle + \langle U^2 \rangle, \quad (8)$$

где λ – множитель Лагранжа, подлежащий в дальнейшем определению.

Уравнение движения электропривода станка-качалки при изменениях нагрузки представим в виде:

$$A(p)\Omega = U + I_{\Omega}, \quad (9)$$

где $I_{\Omega} = [C_A \Psi_2 \cdot K_M (4T_{\mu T} p + 1)] I_H(p)$ – эквивалентное возмущающее воздействие, $A(p) = K_M 4T_{\mu T} J p^2 + K_M J p + K_C = a_2 p^2 + a_1 p + a_0$ – операторный полином, $a_2 = K_M 4T_{\mu T} J$, $a_1 = K_M J$, $a_0 = K_C$ – коэффициенты операторного полинома.

Центрированный процесс изменения тока нагрузки является стационарным процессом с нормальным законом распределения [1, 3], поэтому корреляционная функция аппроксимирована с учетом дисперсии следующим выражением

$$K_{I_H} = D_{I_H} \cdot e^{-\alpha \tau} \cdot \cos \beta \tau, \quad (10)$$

где D_{I_H} – дисперсия случайного изменения тока нагрузки.

Регулятор, полученный в результате синтеза оптимального регулятора скорости, должен быть физически реализуемым, т.е. не содержать звенья «идеального» дифференцирования. Для этого необходимо выполнение условия [3, 4]

$$p \geq n + g - 1, \quad (11)$$

где $2p$ и $2g$ – степени числителя и знаменателя спектральной плотности возмущающего воздействия; n – степень полинома $A(p)$.

Для выполнения условия (11) спектральная плотность эквивалентного возмущающего воздействия аппроксимирована выражением

$$S_{I_3}(\omega) = D_{I_3} \cdot \frac{b'_3(\omega^2)^3 + b'_2(\omega^2)^2 + b'_1\omega^2 + b'_0}{d'_2(\omega^2)^2 + d'_1\omega^2 + d'_0} \quad (12)$$

Переходя к переменной $s=j\omega$ и учитывая, что $j^2=-1$, получим

$$S_{I_3}(s) = D_{I_3} \frac{-b'_3s^6 + b'_2s^4 - b'_1s^2 + b'_0}{d'_2s^4 - d'_1s^2 + d'_0} \quad (13)$$

Выполним синтез оптимального регулятора скорости электропривода станка-качалки по алгоритму, включающему следующие операции [3-5].

1) Факторизуем спектральную плотность $S_{I_3}(s)$

$$S_{I_3}(s) = S_1(s)S_1(-s) = \frac{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}{d_2s^2 + d_1s + d_0} \cdot \frac{-b_3s^3 + b_2s^2 - b_1s + b_0}{d_2s^2 - d_1s + d_0} \quad (14)$$

Полиномы числителя и знаменателя $S_1(s)$ будут содержать корни в левой полуплоскости, а $S_1(-s)$ – в правой.

2) Факторизуем полином

$$A(s) \cdot A(-s) + \lambda = G(s) \cdot G(-s) \quad (15)$$

3) Выполняем разложение на дроби следующего полинома

$$\frac{A(-s)}{G(-s)} \cdot S_1(s) = M_0(s) + M_+(s) + M_-(s) \quad (16)$$

где $M_0(s) = A_1s + A_2$ – целый полином от

частного, $M_+(s) = \frac{A_3s + A_4}{d_2s^2 + d_1s + d_0}$ – дробь с

полюсами в левой полуплоскости,

$M_-(s) = \frac{A_5s + A_6}{c_2s^2 - c_1s + c_0}$ – дробь с полюсами в

правой полуплоскости.

4) Вводим в рассмотрение функцию

$$\frac{1}{F(s)} = \frac{G(s) \cdot S_1(s)}{M_0(s) + M_+(s)} = \frac{z_5s^5 + z_4s^4 + z_3s^3 + z_2s^2 + z_1s + z_0}{r_3s^3 + r_2s^2 + r_1s + r_0} \quad (17)$$

Выполнив деление полинома числителя на полином знаменателя функции (17), и выделяя целую часть, получим

$$\frac{1}{F(s)} = a_2s^2 + \frac{z_4 - a_2r_2}{r_3}s + \frac{z_3 - a_2r_1 - \frac{z_4 - a_2r_2}{r_3}}{r_3} + \frac{h_2s^2 + h_1s + h_0}{r_3s^3 + r_2s^2 + r_1s + r_0} \quad (18)$$

5) Определяем передаточную функцию оптимального регулятора скорости с учётом подстановки $s=p$:

$$W_{pc}(p) = \frac{a_0r_3^2 - z_3r_3 + a_2r_1r_3 + z_4 - a_2r_2}{r_3^2} - \frac{h_2p^2 + h_1p + h_0}{r_3p^3 + r_2p^2 + r_1p + r_0} \quad (19)$$

Как видно из выражения (19), передаточная функция оптимального регулятора не содержит «идеальных» дифференцирующих звеньев. Из анализа структуры оптимального регулятора скорости следует, что он может быть получен из «традиционных» регуляторов введением дополнительных звеньев, учитывающих случайный характер возмущающих воздействий.

Вывод: проведенные исследования оптимальной системы управления скоростью электропривода показывают, что дисперсия выходной координаты в 1,5-2 раза меньше по сравнению с традиционными системами управления [3-5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Горшков, Р.Г. Расчет и моделирование динамических характеристик электропривода штангового скважинного насоса / Р.Г. Горшков, Е.А. Кротков, О.Б. Сигова // Вестник СамГТУ, серия «Технические науки». 2009. № 24. С. 74-80.

2. Шварц, Г.Р. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта газа и нефти. Книга 1 / Г.Р. Шварц, А.М. Абакумов, Л.А. Мигачева и др.; Под ред. Э.Я. Рапопорта. – М.: Машиностроение, 2008. 240 с.
3. Велин, Н.В. Синтез оптимальных стохастических систем управления электроприводами: Учеб. пособие. / Н.В. Велин, Ф.Н. Рассказов. – Самар. гос. техн. ун-т, филиал в г. Сызрани. Самара, 1996. 96 с.
4. Петров, Ю.П. Синтез оптимальных систем управления при не полностью известных возмущающих силах: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 292 с.
5. Сигова, О.Б. Оптимальное управление техническими системами: / Учеб. пособ./ СПб.: Изд-во ПЭИПК, 2006. 91 с.
6. Прохоров, А.С. Аппроксимативный анализ случайных процессов: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2001. 329 с.

OPTIMUM CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMPING UNIT

© 2010 O.B.Sigova

Samara State Technical University

In the given paper questions of development of optimum control system at speed of the electric drive of pumping unit in acting the random disturbances of current loading are considered. Mathematical models of control system by the asynchronous electric motor in view of casual character of disturbing effects are developed. Internal head contours of regulation are adjusted to engineering optimum, and with reference to head contour of speed regulation the technique of synthesis of optimum regulator is developed.

Key words: *pumping unit, electric drive, optimum control*