

УДК 62-503.54

## **Разработка системы управления индукторным электродвигателем в следящем приводе на основе регулируемой гидрообъемной передачи**

Тарасов О. И.<sup>1,\*</sup>, Щербачев П. В.<sup>1</sup>

[\\*tarolig@gmail.com](mailto:tarolig@gmail.com)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Современные робототехнические системы требуют использования следящих приводов. Такие приводы за счет датчика положения и отрицательной обратной связи обеспечивают высокую точность параметров движения. В случае автономных систем к приводам предъявляются еще и высокие энергетические характеристики. В статье рассмотрены преимущества использования гидрообъемной передачи в приводе, следящем по угловому положению выходного звена, по сравнению с механическим редуктором. В связи с тем, что наилучшими энергетическими характеристиками на данный момент обладают индукторные электродвигатели, для такого следящего привода необходима специальная система управления, которая будет учитывать особенности регулируемой гидрообъемной передачи и индукторного электродвигателя. Поэтому в статье предложена структура построения такой системы и изложены принципы ее построения. Рассмотрены различные варианты типов датчиков, которые могут быть использованы в такой системе, и объяснена схема их установки.

**Ключевые слова:** система управления, гидрообъемная передача, следящий привод, индукторный электродвигатель

---

### **Введение**

В современной автономной малогабаритной робототехнике, в которой источником энергии является электрический аккумулятор, наиболее распространены приводы мощностью до 500 Вт с жесткими ограничениями по габаритным характеристикам и требованиями обеспечения максимально возможного значения КПД. На данный момент лучшими показателями КПД, при равных массогабаритных параметрах, обладают индукторные электродвигатели. Степень их интеграции в область приводов насосов возрастает с каждым годом [8]. Для достижения этих показателей требуется построение специальной системы управления [6][8]. Кроме того, в большинстве случаев, невозможно подобрать электродвигатель так, чтобы скорость и момент на его валу соответствовали требуемым на исполнительном устройстве. Для согласования этих параметров используют редукторы раз-

личных типов. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются электро-механический и электрогидравлический привод, принципиальные схемы которых представлены на рисунке 1.

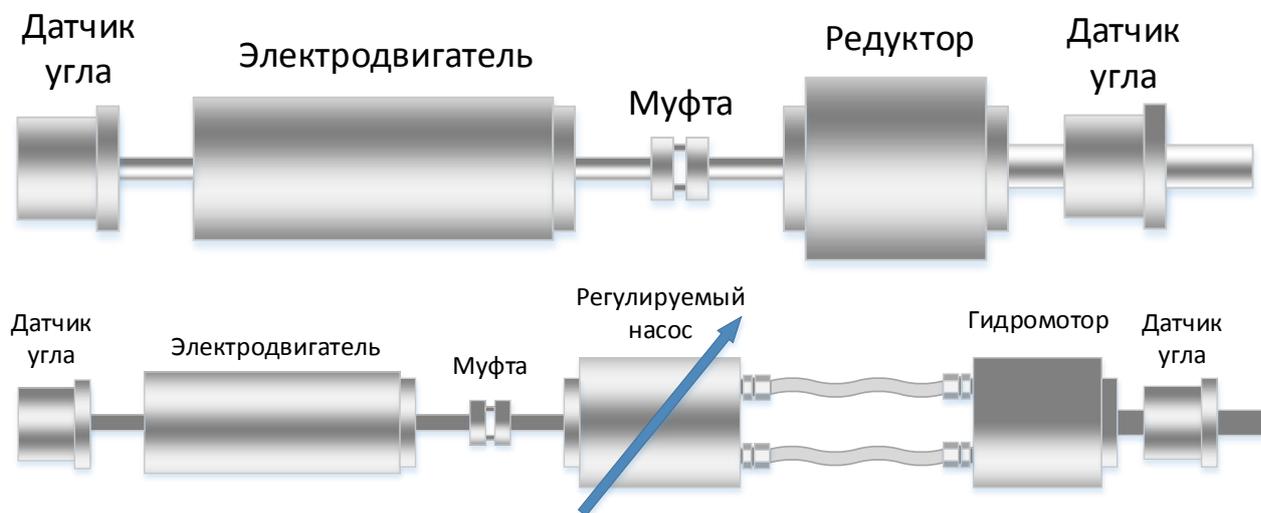


Рисунок 1.

При этом все чаще возникает необходимость движения исполнительного звена по какой-либо траектории с минимальными отклонениями от заданных. Наилучшим методом для обеспечения данной функции является построение следящего по положению привода. Целью данной статьи является рассмотрение различных типов редукторов и обоснование критерия выбора параметров электродвигателя и редуктора для построения энергоэффективного привода, а так же рекомендации по построению системы управления приводом на основе гидростатической передачи.

### Выбор передаточного отношения редуктора в передаче

Большинство производителей механических редукторов и фирмы, занимающиеся интеграцией компонентов, в своих статьях [10][11] предлагают методики выбора передаточного числа редуктора, основывающиеся на соответствии угловой скорости и крутящего момента на выходном валу заданным. При этом не учитываются динамические свойства системы, и не ставится задача оптимизации энергопотребления. В статье [12] компании Schneider Electric рассматривается влияние момента инерции на выходном валу привода на затраты энергии при разгоне двигателя до необходимых оборотов в приводе с редукторами с различными передаточными числами, но не выведен общий критерий, которым следует руководствоваться при выборе параметров электродвигателя и редуктора. В статье [13] достаточно подробно рассматривается критерий выбора оптимального передаточного числа редуктора для достижения максимальных угловых ускорений на выходном ва-

лу привода. Но с помощью выведенного критерия можно подобрать оптимальное передаточное число редуктора для конкретного электродвигателя, но не подобрать оптимальную пару электродвигатель-редуктор. Нижеизложенная статья формулирует критерий, который показывает при каких параметрах редуктора и электродвигателя следует выбирать низкое передаточное число редуктора с высокомоментным двигателем или высокое передаточное число редуктора с быстроходным двигателем одинаковой мощности. Кроме того, в статье рассмотрены общие принципы подхода к выбору значения передаточного числа редуктора для энергоэффективных систем.

В современной технике широко используются типовые схемы для приводов на основе механических редукторов с большим передаточным отношением [2]. При этом для поворота выходного вала на заданный угол, вал электродвигателя должен сделать достаточно большое число оборотов. В этом случае время разгона и торможения электродвигателя мало относительно времени установившегося режима работы. На рисунке 2 приведены примеры графиков переходных процессов по углу (верхний график) и по скорости (нижний график) вала электродвигателя подобной следящей системы. Здесь  $t_1$  – время разгона вала,  $t_2$  – время работы электродвигателя на максимальных оборотах,  $t_3$  – время торможения.

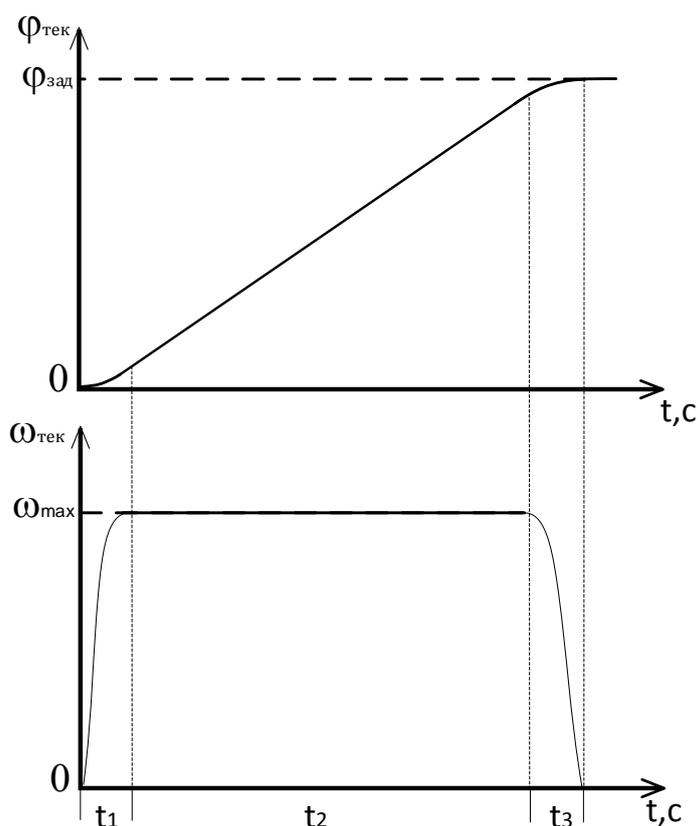
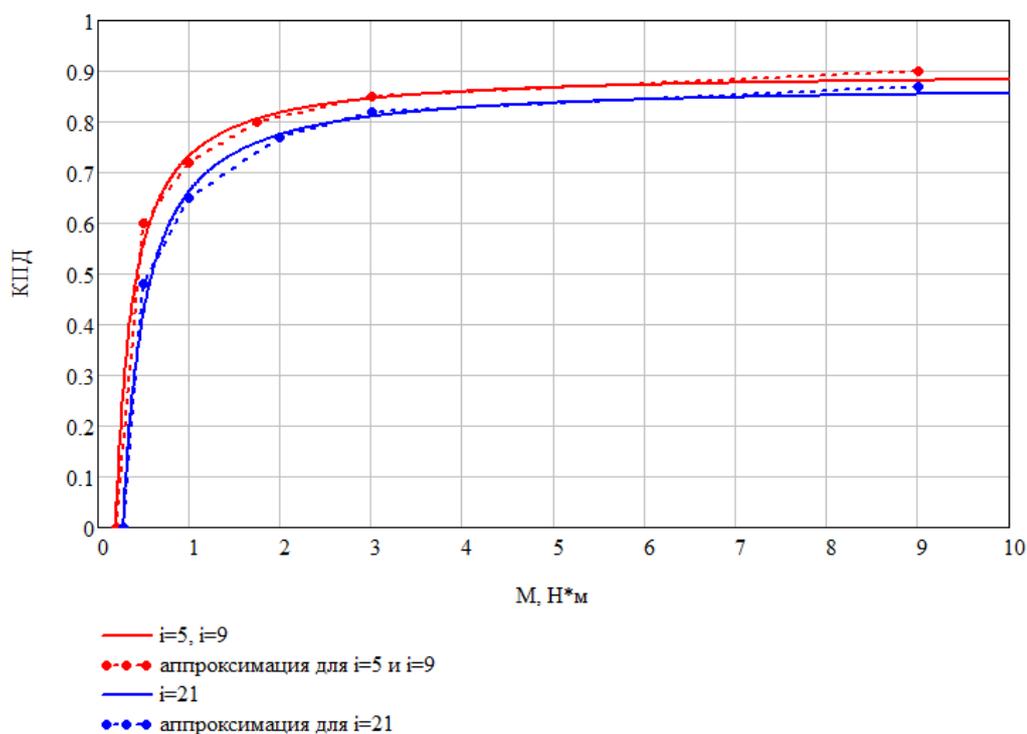


Рисунок 2. Переходный процесс следящей системы с высоким коэффициентом редукции.

В данном случае потери энергии на разгон привода и его торможение будут значительно меньше, чем в процессе установившейся работы, поэтому ими пренебрегают и используют такие методы управления, как бездатчиковая система управления, либо система управления с датчиком скорости на основе счетчика импульсов. В таких системах управления слабыми местами являются старт и работа на низких оборотах (приблизительно 10% от номинальных) в связи с неточностью определения положения ротора. Эта неточность обусловлена недостаточной величиной противо-ЭДС, генерируемой электродвигателем, в случае бездатчиковой системы, либо, в случае использования датчика угловой скорости, слишком редким чередованием импульсов с датчика скорости при значительном угловом ускорении двигателя [2]. Увеличение передаточного числа редуктора и установка высокооборотного двигателя той же мощности снижает негативный вклад переходных процессов (разгона и торможения) на количество затраченной энергии за весь цикл перемещения выходного звена из одного положения в другое.

К сожалению, увеличение передаточного числа редуктора снижает КПД передачи за счет увеличения числа пар трения и количества зубчатых зацеплений. Особенно сильно это проявляется в малогабаритных системах. Оценить это можно на примере линейки редукторов компании Harmonic Drive (Рисунок 3). Данная компания является одной из лидирующих на рынке малогабаритных редукторов, а их продукция имеет высокие массогабаритные и энергетические характеристики.



**Рисунок 3.** Примеры графиков зависимости КПД от момента для редукторов одного типоразмера, но разного передаточного отношения  $i$  линейки малогабаритных редукторов фирмы Harmonic Drive.

Из этих графиков видно, что для увеличения КПД системы следует снижать передаточное число редуктора до минимально возможного, ограниченного возможностями электродвигателя. Сам электродвигатель, в данном случае, следует выбирать низкоскоростной и высокомоментный.

Еще одним критерием выбора передаточного отношения редуктора может быть максимальное развиваемое угловое ускорение на выходном валу передачи. Особенно актуально это в случае использования такого привода в системах с обратной связью по положению, которые часто используются в роботизированных комплексах. Для вывода этого критерия вычислим угловые ускорения выходных валов передач для двух двигателей с одинаковой номинальной мощностью  $P_{ном}$  и одинаковой нагрузкой на выходной вал передачи  $J_{н2} = J_{н1}$  и  $M_{внешн2} = M_{внешн1}$ , но установленными редукторами с разным передаточным отношением  $i_1$  и  $i_2$  ( $i_1 > i_2$ )

$$\varepsilon_{пер} = \frac{\varepsilon_{эд}}{i}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{пер}$  – угловое ускорение выходного вала передачи,

$\varepsilon_{эд}$  – угловое ускорение ротора электродвигателя,

$i$  – передаточное отношение редуктора.

Угловое ускорение вала двигателя вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{эд} = \frac{M_{эд} - \frac{M_{внешн}}{i}}{J_{пр}}, \quad (2)$$

где  $M_{внешн}$  – момент внешней нагрузки на выходной вал передачи,

$J_{пр}$  – приведенный момент инерции системы к валу ротора электродвигателя. Он вычисляется по формуле [4]

$$J_{пр} = J_{эд} + J_{ред} + J_{н} \frac{1}{i^2}, \quad (3)$$

где  $J_{эд}$  – момент инерции ротора электродвигателя,

$J_{ред}$  – момент инерции подвижных частей редуктора, приведенный к быстроходному валу передачи,

$J_{н}$  – момент инерции нагрузки.

Обобщив вышеприведенные формулы с (1) по (3) получим выражение для ускорения выходного звена передачи с большим коэффициентом редукции  $i_1$  и малым коэффициентом редукции  $i_2$

$$\varepsilon_{пер} = \frac{\frac{M_{эд} - \frac{M_{внешн}}{i}}{J_{эд} + J_{ред} + J_{н} \frac{1}{i^2}}}{i}. \quad (4)$$

Так как двигатели одинаковой номинальной мощности и на выходных валах двух рассматриваемых передач момент должен быть одинаковый, то момент на валу высокомоментного электродвигателя  $M_{эд2}$  можно вычислить следующим образом

$$M_{эд2} = M_{эд1} \cdot i_1 / i_2 . \quad (5)$$

Подставив условия одинаковой нагрузки и выражение (5) в выражения (4), получим, что для достижения одинаковых величин ускорений на выходном валу передачи необходимо, чтобы выполнялось следующее условие

$$J_{эд2} + J_{ред2} = (J_{эд1} + J_{ред1}) \left(\frac{i_1}{i_2}\right)^2 . \quad (6)$$

Исходя из выражения (6), можно сформулировать критерий: пока отношение суммы моментов инерции ротора высокомоментного электродвигателя и редуктора с низким передаточным отношением к сумме моментов инерции ротора высокооборотистого электродвигателя и редуктора с высоким передаточным отношением меньше квадрата отношения передаточного числа редуктора с большим передаточным отношением к передаточному числу редуктора с низким передаточным отношением угловое ускорение на валу передачи с высокомоментным двигателем будет выше.

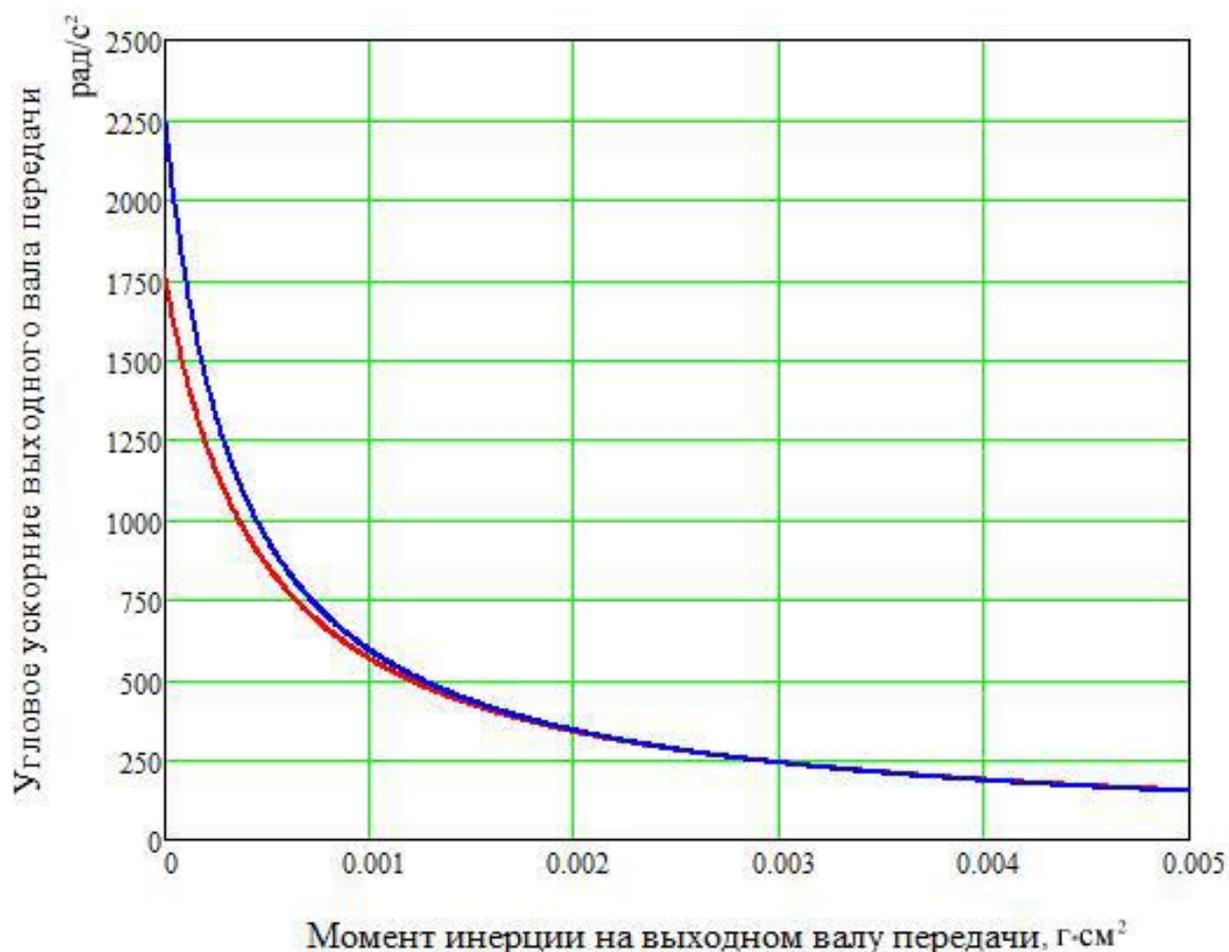
Необходимо отметить, что в вышеприведенных расчетах не учитывались КПД двигателей и редукторов. Как писалось выше с ростом передаточного числа редуктора его КПД снижается, а КПД электродвигателя снижается не значительно [9].

В качестве примера рассмотрим механические передачи на основе малогабаритных планетарных редукторов фирмы Harmonic Drive. Выберем один редуктор с передаточным отношением  $i_1 = 45$  (HPG-11-A-45) и второй с передаточным отношением  $i_1 = 5$  (HPG-11-A-5). Для них подберем индукторные электродвигатели фирмы Maxon Motor: электродвигатель № 475522 и № 148877 соответственно. Получились две передачи с характеристиками, представленными в таблице 1.

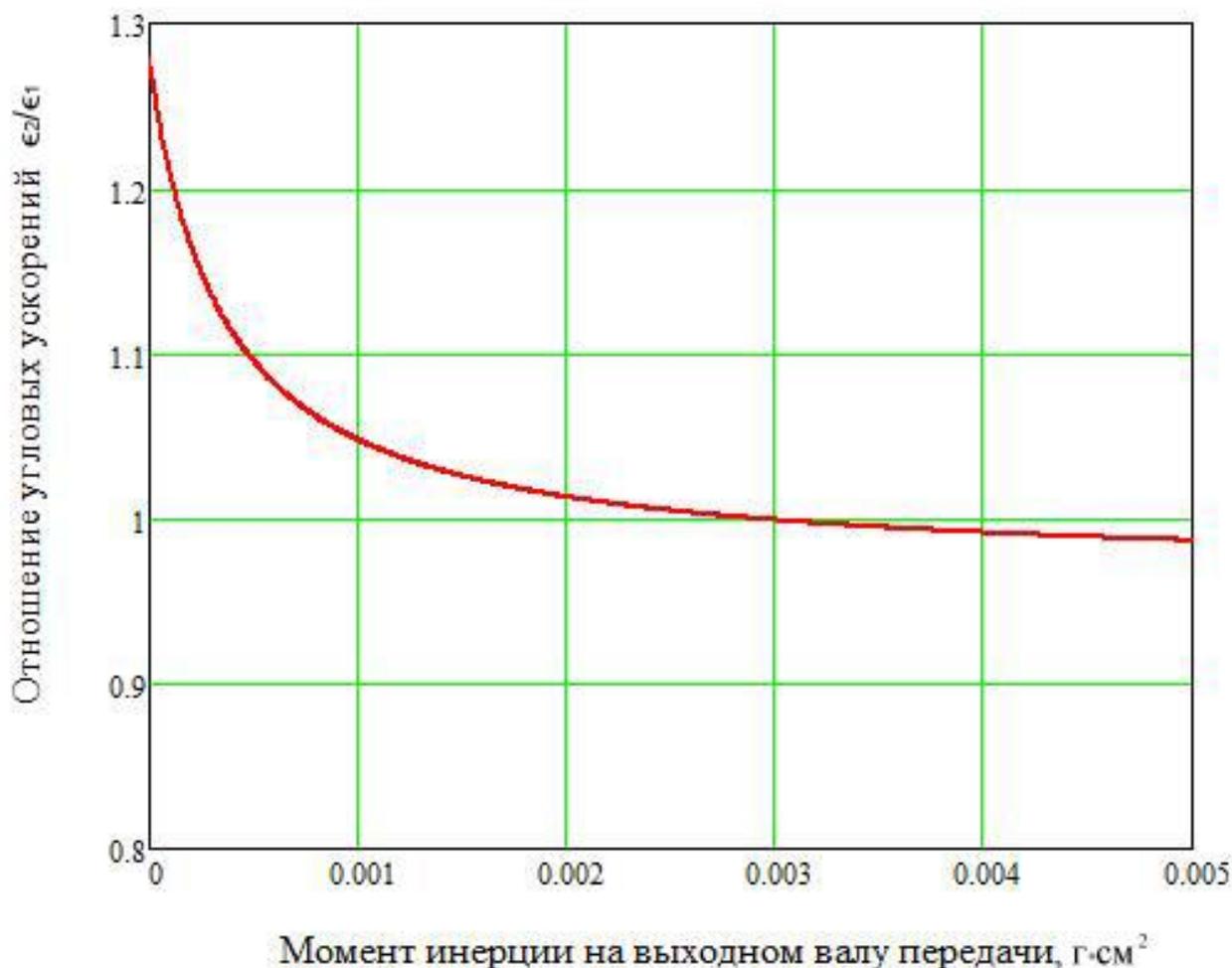
Таблица 1. Характеристики механических передач.

| Редуктор  | HPG-11-A-45             | HPG-11-A-5             |
|---|-------------------------|------------------------|
| Передаточное отношение редуктора  | 45                      | 5                      |
| Максимальный КПД редуктора  | 83%                     | 92%                    |
| Момент инерции вращающихся частей редуктора, приведенный к быстроходному валу | 0.49 гм*см <sup>2</sup> | 3.6 гм*см <sup>2</sup> |
| Электродвигатель  | № 475522                | № 14887                |
| Номинальный момент на валу электродвигателя                                   | 24 Н мм                 | 187 Н мм               |
| Номинальная мощность электродвигателя   | 145 Вт                  | 137 Вт                 |
| Момент инерции ротора электродвигателя  | 1.81 гм*см <sup>2</sup> | 137 гм*см <sup>2</sup> |
| Максимальный КПД электродвигателя   | 92.4%                   | 92%                    |

Если подставить величины, приведенные в таблице 1 в выражение (4), то для этих двух передач можно построить график зависимости углового ускорения на выходном валу передачи в зависимости от установленного на этот вал момента инерции (Рисунок 4) и график зависимости отношения углового ускорения на выходном валу передачи с высокомоментным двигателем к угловому ускорению на выходном валу передачи с высокооборотистым двигателем  $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$  от установленного на эти валы момента инерции  $J_H$  (Рисунок 5).



**Рисунок 4.** График зависимости углового ускорения на выходном валу передачи в зависимости от установленного на этот вал момента инерции. Красный график –  $\varepsilon_1$  (редуктор НРГ-11-А-45), синий график –  $\varepsilon_2$  (редуктор НРГ-11-А-5).



**Рисунок 5.** График зависимости отношения угловых ускорений  $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$  на выходном валу передач от установленного на эти валы момента инерции.

Из рисунка 5 видно, что, начиная с некоторой величины момента инерции нагрузки, отношение становится меньше единицы, а это означает, что передача с редуктором с большим коэффициентом редукции начинает обгонять передачу с низким коэффициентом редукции. Для данных передач эта величина равна  $28795 \text{ г}\cdot\text{см}^2$ , что более чем в 200 раз превышает момент инерции вала высокомоментного электродвигателя. Это возникает в результате того, что на практике не удастся подобрать два электродвигателя одинаковой мощности с подходящими номинальными моментами для имеющихся редукторов и в данном случае высокомоментный двигатель имеет мощность меньшую, чем высокоскоростной.

Исходя из того, что большее значение КПД передачи будет достигаться при меньших значениях коэффициента редукции и из того, что выходной вал передачи с низким передаточным отношением будет развивать большие угловые ускорения (в вышеописан-

ных пределах момента инерции ротора двигателя и редуктора) для рассматриваемых в этой статье задач следует строить передачи на основе редукторов с низким передаточным отношением.

В рассматриваемом случае время разгона и торможения электродвигателя будет сравнимо с временем работы двигателя на номинальном режиме, а потерями энергии во время этих процессов пренебрегать нельзя. В связи с этим, пользоваться теми же методами, что и в случае с редуктором с большим передаточным отношением нельзя, а необходимо применять методы для снижения потерь энергии на разгонных режимах работы электродвигателя. Одним из способов решения данной проблемы является установка датчика абсолютного углового положения ротора или комбинации датчиков, выполняющих данную задачу. Это позволит с высокой точностью контролировать положение ротора электродвигателя для задания вектора магнитного поля. Кроме того, такой датчик, по понятным причинам, должен быть многооборотным. К наиболее распространенным типам датчиков, обладающих такими характеристиками, можно отнести следующие:

1. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор (резольвер);
2. Поворотный дифференциальный трансформатор (RVDT) в комбинации с датчиками Холла;
3. Цифровой оптический датчик.

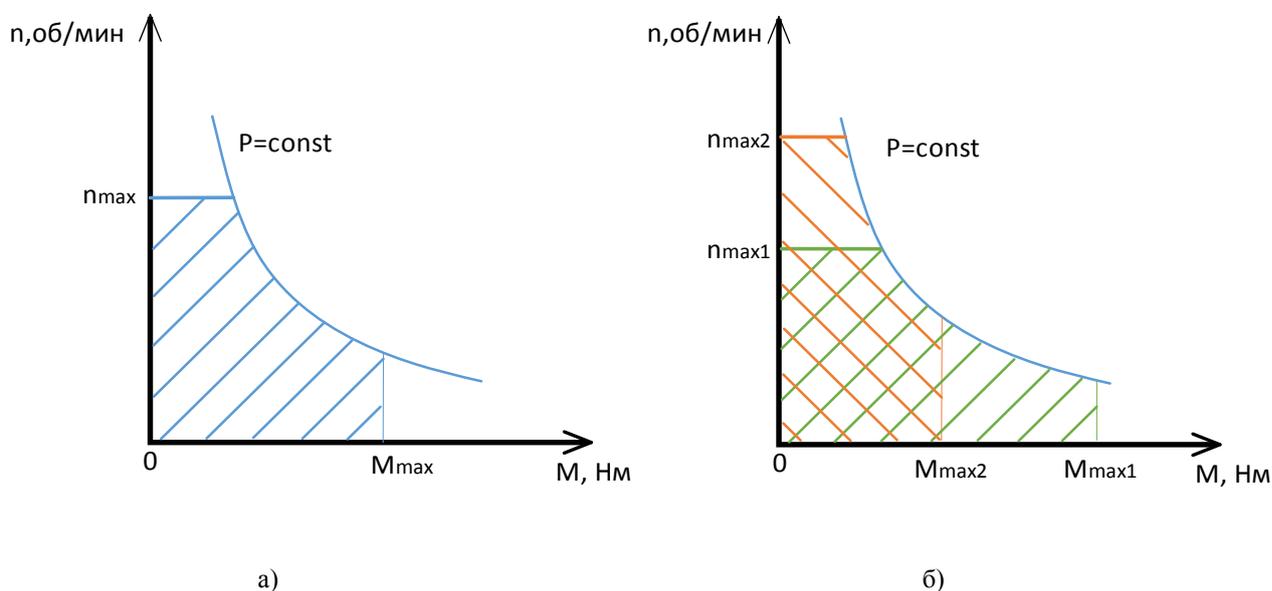
Каждый тип датчиков имеет свои преимущества и недостатки при одинаковых точностных характеристиках. Цифровые оптические датчики имеют минимальные шумовые характеристики и имеют наиболее простую схему обработки выходного сигнала, но плохо устойчивы к ударным нагрузкам и не могут работать в случае погружения в масло (особо актуально для гидравлических передач). Поворотные дифференциальные трансформаторы имеют ограниченный диапазон измерений в 180 градусов, который можно расширить, установив дополнительные дискретные датчики, которые будут указывать в какой четверти окружности находится в данный момент вал электродвигателя. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор для исключения контакта между статором и ротором требует дополнительно кольцевой трансформатор для передачи питающего напряжения на ротор, что увеличивает его габаритные размеры, но обладает рабочим диапазоном в 360 градусов и устойчив к ударно-вибрационным нагрузкам.

### **Выбор типа редуктора передачи**

Существенным недостатком схемы с механическим редуктором является невозможность изменения передаточного числа передачи. В этом случае при возникновении нештатной ситуации невозможно развить дополнительный момент в ущерб скорости вращения. В робототехнике существует масса подобных проблем, связанных с заклиниванием

каких-либо устройств в процессе передвижения, или необходимости без нагрузки быстро переместиться до какого-либо объекта, выполнить операции с высокой нагрузкой, и без нагрузки вернуться в исходное положение. Для подобных задач с использованием механического редуктора одним из вариантов решения будет установка электродвигателя заведомо более мощного, способного перекрыть весь диапазон нештатных моментов и скоростей, которые не требуются в номинальном режиме работы привода. Вторым вариантом будет установка после редуктора коробки передач, что еще сильнее снизит КПД системы и существенно увеличит ее габаритные размеры и массу.

Этого недостатка лишена гидравлическая передача на основе регулируемого насоса. При этом габаритные размеры нерегулируемого и регулируемого насоса мало отличаются друг от друга [1]. Изменяя рабочий объем насоса  $V_{н0}$  можно быстро и плавно менять передаточное отношение электрогидравлической передачи, что существенно расширит диапазон рабочих режимов. На рисунке 6 представлены графики выходной мощности в координатах частота вращения и момент на входном валу гидропередачи. На рисунке 6а видно, что рабочий диапазон передачи с одним передаточным числом (область, заштрихованная синим цветом) ограничен максимальным значением частоты вращения и максимальным моментом, которые определяются величиной коэффициента редукции, и максимальной мощностью электродвигателя. На рисунке 6б представлены области, для двух значений коэффициентов редукции: высокого (зеленая область) и низкого (оранжевая область). Это наглядно демонстрирует расширение рабочего диапазона передачи с переменным значением коэффициента редукции, по сравнению с постоянным.



**Рисунок 6.** Диапазон рабочих режимов для: а – привода с неизменяемым передаточным отношением, б – привода с изменяемым передаточным отношением.

При борьбе за проценты КПД необходимо снижать количество трущихся поверхностей. В случае гидравлической передачи можно поместить электродвигатель и насос в

один корпус, а лишние уплотнения (например, уплотнения вала насоса и вала электродвигателя) убрать. При этом электродвигатель будет погружен в гидравлическое масло. В этом случае все системы подвода и отвода энергии (электрические и гидравлические линии) будут неподвижными. Если при этом еще организовать постоянное обтекание корпуса электродвигателя гидравлическим маслом, то, при правильном расчете и организации теплообмена, это будет эффективным методом отвода теплоты от обмоток электродвигателя, что позволит электродвигателю дольше работать в режимах, превышающих номинальный. Проблема отвода теплоты от электродвигателя и механического редуктора является серьезным недостатком механической передачи. Она особо сильно возникает в малогабаритных системах [8]. Следствием погружения электродвигателя в гидравлическое масло будет требование устойчивости датчика угла поворота вала электродвигателя к погружению в гидравлическую жидкость. В этом случае в качестве датчика угла поворота вала электродвигателя лучше всего подойдет резольвер (СКВТ). Кроме того, для снижения сил вязкого трения, возникающих в результате вращения ротора электродвигателя в гидравлическом масле, следует снижать частоту вращения ротора. Это является еще одним доводом к тому, чтобы снижать передаточное число передачи.

Значение передаточного отношения гидропередачи можно получить из уравнения баланса расходов [1]

$$Q_n = Q_{гм} + Q_{ут} + Q_{пер} , \quad (7)$$

где:  $Q_n$  – объемная подача насоса,  
 $Q_{гм}$  – теоретический расход гидромотора,  
 $Q_{ут}$  – суммарные утечки насоса и мотора,  
 $Q_{пер}$  – суммарные перетечки насоса и гидромотора.

Объемную подачу насоса можно рассчитать по следующей формуле

$$Q_n = V_{н0} \cdot n_n , \quad (8)$$

где  $V_{н0}$  – рабочий объем насоса,  
 $n_n$  – частота вращения вала насоса.

Теоретический расход гидромотора выражается формулой:

$$Q_m = V_{м0} \cdot n_m , \quad (9)$$

где  $V_{м0}$  – рабочий объем гидромотора,  
 $n_m$  – частота вращения вала гидромотора.

Теперь, если подставить выражения (8) и (9) в выражение (7) и сделать некоторые преобразования, получим

$$i_{гп} = \frac{n_M}{n_H} = \frac{V_H}{V_M} - \frac{Q_{ут}}{n_H \cdot V_M} - \frac{Q_{пер}}{n_H \cdot V_M}$$

где  $i_{гп}$  – передаточное отношение гидропередачи.

Из этого выражения видно, что  $Q_{ут}$  и  $Q_{пер}$  уменьшают передаточное число гидропередачи на некоторую величину, которая, в общем случае, зависит от давления в гидросистеме и скоростей вращения валов гидроагрегатов. Таким образом передаточное число может меняться в зависимости от режима работы гидравлической передачи. В связи с этим, нет возможности однозначно установить положение вала электродвигателя по положению вала гидромотора и наоборот, и потому установить датчик угла поворота только на один элемент, а угловое положение второго вычислять по значению первого. Необходимо устанавливать датчик угла поворота как на вал электродвигателя, так и на выходной вал гидромотора (Рисунок 7).

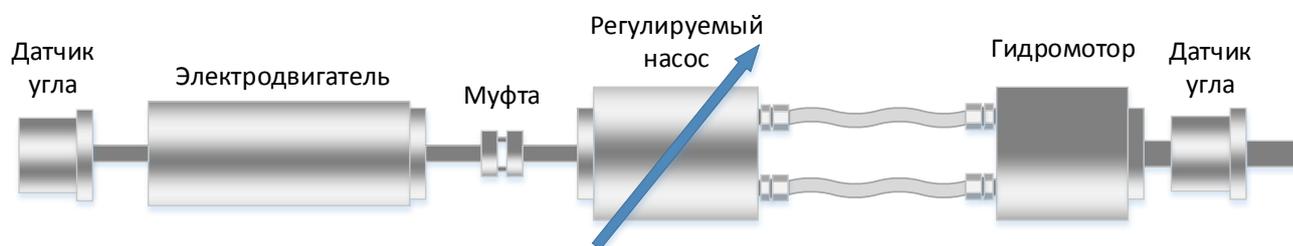


Рисунок 7.

В этом случае датчик угла поворота вала электродвигателя будет использоваться в системе управления двигателем, а датчик угла поворота вала гидромотора будет замыкать обратную связь по угловому положению следящей системы привода.

## Построение структурной схемы системы управления электродвигателем

Структурную схему системы управления электродвигателем можно составить исходя из нижеследующих соображений. Для получения величины рассогласования между требуемым значением угла поворота вала можно воспользоваться формулой

$$\Delta\varphi = \varphi_{зад.гм} - \varphi_{тек.гм},$$

где  $\varphi_{зад.гм}$  – необходимый (заданный) угол поворота вала гидромотора,

$\varphi_{тек.гм}$  – текущее значение угла поворота гидромотора,

$\Delta\varphi$  – рассогласование между заданным углом поворота вала и текущим;

Данное рассогласование следящая система должна компенсировать для достижения необходимого углового положения выходного вала. В случае электродвигателя с редуктором вал электродвигателя должен повернуться на угол больший угла рассогласования на коэффициент редукции передачи. В связи с тем, что коэффициент редукции в случае гидравлической передачи неизвестен (и может изменяться в процессе работы),  $\varphi_{тек.гм}$  постоянно должен контролироваться датчиком, находящимся на валу гидромотора. Угол рассогласования

гласования между текущим и конечным положением вала ротора электродвигателя будет вычисляться по формуле

$$\Delta\alpha = \Delta\varphi \cdot i_{гп},$$

где  $\Delta\alpha$  – угол рассогласования между текущим и конечным положением вала ротора;

$i_{гп}$  – передаточное отношение гидропередачи.

Так как величина  $\Delta\alpha$  зависит от величины  $\Delta\varphi$  и в процессе работы привода постоянно вычисляется, то переменное передаточное отношение не внесет позиционной ошибки в конечное положение ротора гидромотора, но изменит коэффициент усиления разомкнутого контура следящей системы. В результате этого, если в системе управления заложить статичный  $i_{гп}$ , настроенный для определенного режима работы передачи, то электрогидравлический следящий привод при низком передаточном отношении может стать неустойчивым, а на высоких передаточных отношениях переходный процесс может стать слишком затянутым [5]. Для решения этой проблемы необходимо в системе управления следящим приводом изменять коэффициент  $i_{гп}$  в соответствии с текущим рабочим объемом регулируемого насоса.

После вычисления необходимого угла рассогласования необходимо сформировать такое управляющее воздействие на электродвигатель, чтобы в любом режиме работы он развивал максимальное значение КПД. Для этого необходимо так направлять вектор потокосцепления статора  $\Psi_s$ , чтобы при имеющемся значении потребляемой мощности на данной скорости вращения момент на валу был максимальным. В связи с тем, что магнитный момент, возникающий в электродвигателе, пропорционален векторному произведению потокосцепления статора на потокосцепление ротора  $\Psi_r$  [3], то можно записать выражение

$$M_{эд} = k_L \|\Psi_s\| \|\Psi_r\| \sin \theta,$$

где  $M_{эд}$  – магнитный момент на валу электродвигателя,

$\theta$  – угол между векторами потокосцепления статора и ротора,

$k_L$  – коэффициент пропорциональности, который учитывает индуктивность обмоток статора, количество пар полюсов электродвигателя и магнитные свойства магнитопроводов.

Из этого выражения следует, что для максимальной величины момента угол между потокосцеплениями статора и ротора должен составлять  $90^\circ$ . И, соответственно, для того, чтобы задать требуемое направление вектора потокосцепления статора необходимо определить направление вектора потокосцепления ротора. В связи с тем, что у индукторного двигателя с явнополюсным ротором источником магнитного поля является постоянный магнит, жестко зафиксированный на валу, то направление вектора потокосцепления совпадает с угловым положением ротора, а величина модуля вектора определяется свойствами магнита. Поэтому для определения направления потокосцепления ротора используют датчик углового положения вала электродвигателя. Направление вектора потокосцепле-

ния статора совпадает с направлением суммарного вектора тока, протекающего в обмотках статора. Поэтому если так задавать значения токов в обмотках, чтобы их суммарный вектор был расположен под углом  $90^\circ$  к вектору потокосцепления ротора, то мы будем получать максимальный момент на роторе электродвигателя и, соответственно, максимально возможное значение КПД электродвигателя при данной величине модуля вектора суммарного тока.

Величина токов в обмотках статора определяется приложенными к ним величинами напряжений, величинами противо-ЭДС, возникающих в каждой обмотке в результате вращения магнитного поля ротора и динамическими процессами изменения токов в каждой обмотке, которые возникают по причине того, что обмотки статора обладают индуктивностью. Чтобы снизить влияние противо-ЭДС и динамических процессов на вектор тока в систему управления электродвигателем вводят глубокую обратную связь по значениям величин токов в каждой обмотке, которые получают с помощью датчиков тока, установленных в каждой фазе электродвигателя. В качестве датчиков тока могут быть использованы резисторы низкого номинала. Таким образом определяя перепад напряжения на этих резисторах можно по закону Ома вычислить ток в каждой фазе. К сожалению, данное решение, хоть и является наиболее простым, не подходит для данной системы т.к. на токоизмерительных резисторах будет рассеиваться мощность, что снизит КПД системы. В качестве более подходящего решения будет выбор датчиков тока на основе эффекта Холла. Эти датчики обладают низким сопротивлением (сравнимым с сопротивлением проводника) и высокими динамическими характеристиками. Линейку подобных датчиков тока на различные диапазоны измеряемой величины вместе со встроенным усилителем выпускает фирма Allegro Microsystems [7].

Из вышеизложенного следует, что для получения максимального КПД в электрогидравлической передаче, следящей по углу поворота вала гидромотора, система управления должна задавать такие значения напряжений на обмотках электродвигателя, чтобы направление вектора суммарного тока фазы всегда отличалось от направления потокосцепления ротора на  $90^\circ$  в сторону необходимого поворота, а модуль вектор тока изменялся пропорционально величине рассогласования текущего и желаемого положения ротора электродвигателя. Для графической иллюстрацией данного принципа (рисунок 8) следует ввести две ортогональные системы координат: одна система координат с осями  $\alpha$  и  $\beta$  будет неподвижной, при том ось  $\alpha$  будет совпадать с осью одной из обмоток статора, а вторая система координат с осями  $d$  и  $q$  будет вращающейся, где направление оси  $d$  будет совпадать с вектором потокосцепления ротора.

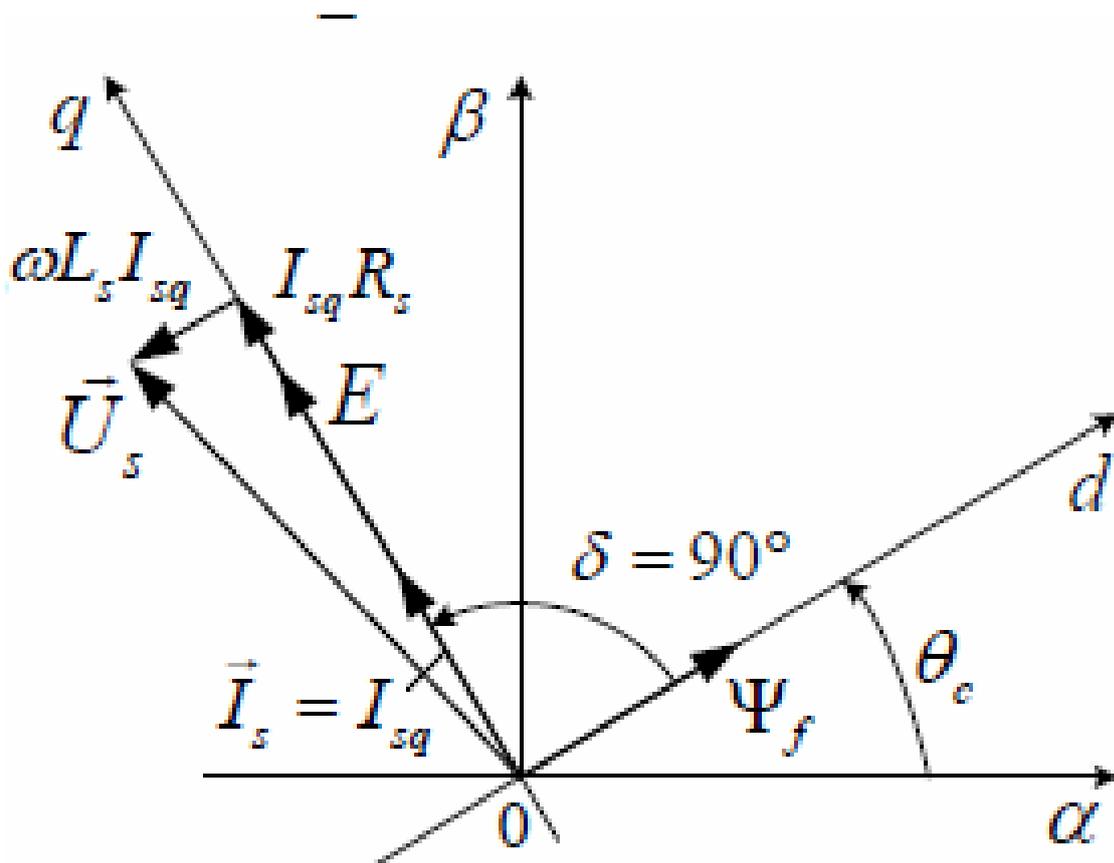


Рисунок 8. Графическое изображение векторов суммарного тока и напряжения.

Пусть вектор потокосцепления ротора  $\Psi_f$  расположен под углом  $\theta_c$  к оси  $\alpha$ . Тогда суммарный вектор тока в статоре будет расположен вдоль оси  $q$ . Вектор суммарного значения напряжений, поданного на обмотки статора  $U_s$ , за счет глубоких обратных связей по токам в обмотках должен быть повернут на дополнительный угол, который компенсирует реактивное сопротивление обмотки двигателя  $\omega L_s I_{sq}$ , где  $\omega$  – скорость вращения вала электродвигателя,  $L_s$  – индуктивность обмотки статора,  $I_{sq}$  – проекция вектора тока, протекающего через статор на ось  $q$ . При этом для того, чтобы вычислить требуемые значения напряжений на каждой обмотке статора электродвигателя необходимо разложить полученный вектор напряжения  $U_s$  на составляющие по осям обмоток статора. Получатся три проекции:  $U_{sU}$ ,  $U_{sV}$ ,  $U_{sW}$ , величины которых и определяют уровни напряжений на каждой катушке. В соответствии с вычисленными значениями фазных напряжений система управления должна выработать необходимый управляющий сигнал на силовой инвертор, подключенный к электродвигателю. Структурная схема всей следящей системы показана на рисунке 9.

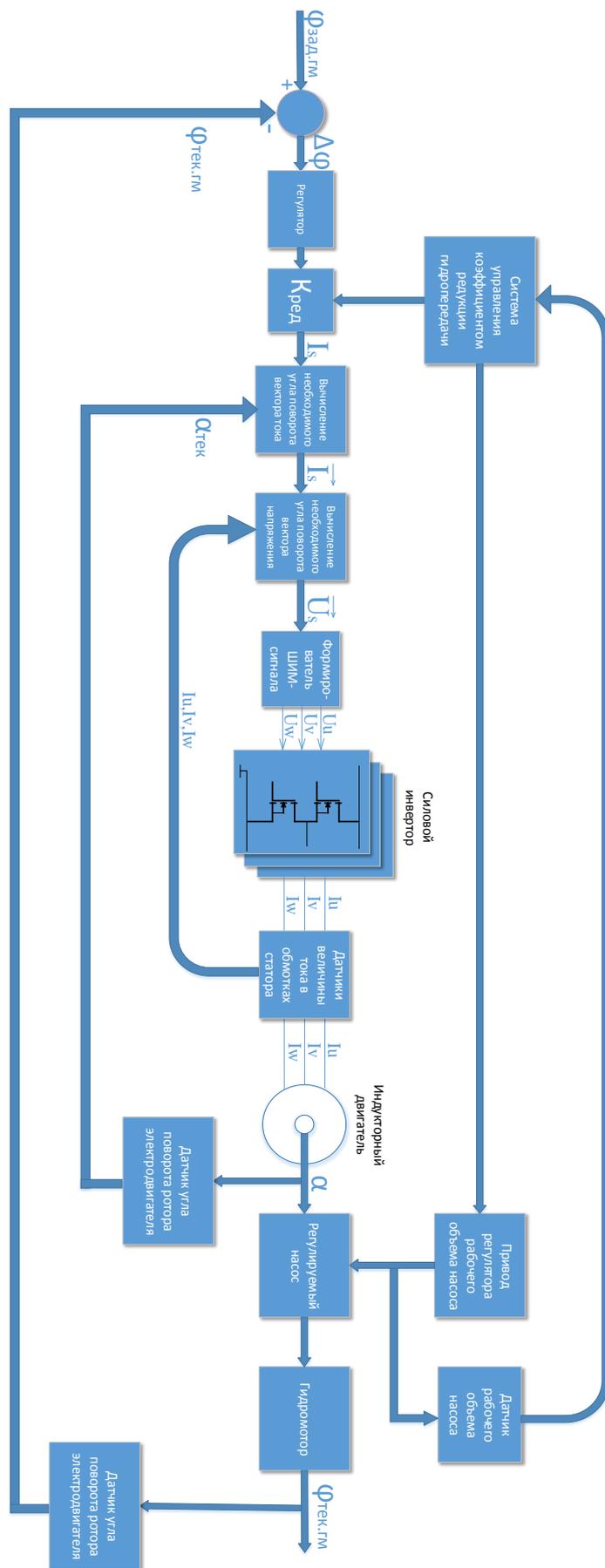


Рисунок 9. Структурная схема следящей системы на основе гидропередачи.

## Заключение

В статье рассмотрены основные принципы построения энергоэффективных приводов на основе электродвигателя и редуктора. Установлено, что в современный малогабаритных автономных системах для достижения высоких энергетических характеристик и максимальных угловых ускорений на исполнительном звене привода следует устанавливать высокомоментный двигатель с редуктором с малым передаточным отношением. Использование регулируемой гидравлической передачи в качестве редуктора позволяет расширить рабочий диапазон привода, но требует построения специальной системы управления. В статье описаны основные принципы построения подобной системы управления, которая позволит эффективно с точки зрения КПД управлять электродвигателем. В качестве научной новизны сформулирован критерий, руководствуясь которым можно подобрать оптимальные параметры системы электродвигатель-редуктор для достижения максимальных ускорений на выходном валу привода. Кроме того, рассмотрено влияние утечек в гидростатической передаче на передаточное число системы.

## Список литературы

1. Башта Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1974. 606 с.
2. Бездатчиковое управление электродвигателем с постоянными магнитами // Инженерные решения: сайт компании. Режим доступа: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/sensorless/#start> (дата обращения 18.10.2014).
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2008. 298 с.
4. Кузенков В.В., Самойлова М.В., Тарабарин В.Б. Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 169 с.
5. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 464 с.
6. Ryba J. Sine Voltage Powered 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Hall Sensors: Designer Reference Manual – Rev. 0. Freescale Semiconductor, Inc., 2003. Available at: [http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref\\_manual/DRM036.pdf](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM036.pdf) , accessed 18.10.2014.
7. 0 to 50 A Integrated Conductor Sensor ICs // Allegro MicroSystems, LLC: website. Available at: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs.aspx> , accessed 01.11.2014.

8. Dinca L., Corcau J.-I., Grigorie T.L., Jula N., Mingireanu F. Mathematical Modeling and Analysis of an Electro-Hydrostatic Servo Actuator with Brushless D.C. Motor // Proceedings of the 14th International Conference on Applied Computer Science (ACS '14); Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Supported Education (COSUE '14) "Modern Computer Applications in Science and Education" (Cambridge, MA, USA, January 29-31, 2014). WSEAS Press, 2014. P. 157-163.
9. Brushless DC Motors // Maxon Motor: website. Available at: [http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/products?productTeaserFilter=Filter\\_Brushless\\_DC\\_Motors](http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/products?productTeaserFilter=Filter_Brushless_DC_Motors) , accessed 01.11.2014.

## **Development of BLDC Electric Motor Control System In Hydraulic Servo Drive Based on Variable Hydrostatic Transmission**

O.I. Tarasov<sup>1,\*</sup>, P.V. Scherbachev<sup>1</sup>

[tarolig@gmail.com](mailto:tarolig@gmail.com)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** control system, hydrostatic transmission, servo drive, BLDC electric motor

---

Modern robotic systems require the use of servo drives. Owing to encoder and negative feedback these drives ensure highly accurate motion parameters. In case of autonomous systems drives must also have high power characteristics. Moreover, in most cases, it was impossible to select the motor so that the speed and torque on its shaft were in compliance with those of required by the actuator. To match these parameters different types of reducers are used. The article justifies and considers a selection criterion of the gear ratios for such transmission. For clarity, there is an example of selecting a motor and a gear for above transmission, taking into account the proposed criterion. In addition, the article discusses the advantages of using hydrostatic transmission in the drive, which monitors the angular position of the output level, in comparison with a mechanical gearbox. Due to the fact that, at the moment, BLDC motors have the best power characteristics, such a servo drive requires a special control system that will take into account the features of variable hydrostatic transmission and electric BLDC motor. Therefore, the paper proposes a structure of such a system and set out the principles of its construction. Various embodiments of sensor types that may be used in this system and their installation scheme explained.

### **References**

1. Bashta T.M. *Ob'emnye nasosy i gidravlicheskie dvigateli gidrosistem* [Positive displacement pumps and hydraulic motors of hydraulic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 606 p. (in Russian).
2. Bezdatchikovoje upravlenie elektrodvigatelem s postoyannymi magnitami [Sensorless control of permanent-magnet motor]. Inzhenernye resheniya [Engineering solutions]: company website. Available at: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/sensorless/#start> , accessed 18.10.2014. (in Russian).
3. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC drives]. Ivanovo, ISPU Publ., 2008. 298 p. (in Russian).

4. Kuzenkov V.V., Samoylova M.V., Tarabarin V.B. *Teoriya mekhanizmov i mashin. Kursovoe proektirovanie* [Theory of mechanisms and machines. Course design]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 169 p. (in Russian).
5. Popov D.N. *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem* [Dynamics and regulation of hydraulic and pneumatic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 464 p. (in Russian).
6. Ryba J. *Sine Voltage Powered 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Hall Sensors: Designer Reference Manual – Rev. 0*. Freescale Semiconductor, Inc., 2003. Available at: [http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref\\_manual/DRM036.pdf](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM036.pdf) , accessed 18.10.2014.
7. 0 to 50 A Integrated Conductor Sensor ICs. Allegro MicroSystems, LLC: website. Available at: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs.aspx> , accessed 01.11.2014.
8. Dinca L., Corcau J.-I., Grigorie T.L., Jula N., Mingireanu F. Mathematical Modeling and Analysis of an Electro-Hydrostatic Servo Actuator with Brushless D.C. Motor. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Applied Computer Science (ACS '14); Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Supported Education (COSUE '14) "Modern Computer Applications in Science and Education"*, Cambridge, MA, USA, January 29-31, 2014. WSEAS Press, 2014, pp. 157-163.
9. Brushless DC Motors. Maxon Motor: website. Available at: [http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/products?productTeaserFilter=Filter\\_Brushless\\_DC\\_Motors](http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/products?productTeaserFilter=Filter_Brushless_DC_Motors) , accessed 01.11.2014.