

Автоматическое выравнивание нагрузки в многодвигательном электроприводе

Д.В. Волков

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени

М.И. Платова, Новочеркасск

Аннотация: Многодвигательные электроприводы представляют собой системы, в которых суммируется вращающий момент, создаваемый двумя и более электродвигателями. Причем такое суммирование может осуществляться как непосредственно на общем валу, так и опосредованно, например, через общую нагрузку. При этом возникает проблема распределения суммарного момента между двигателями. Обычно для решения этой проблемы добиваются равномерного распределения моментов между двигателями. Для получения равенства моментов отдельных двигателей многодвигательного привода существуют различные способы, одним из которых является совмещение их механических характеристик путем воздействия по отдельности на жесткость механической характеристики и скорость холостого хода.

Ключевые слова: многодвигательный электропривод, выравнивание нагрузок, автоматическое регулирование, механическая характеристика, математическое описание распределения нагрузок, наблюдение распределения нагрузок.

Введение

Многодвигательные электроприводы составляют важный класс приводов в машиностроении. Такие приводы применяются в случаях, когда по каким-либо причинам не удастся применить единичный двигатель требуемой мощности [1]. Причем двигатели могут быть связаны механически как непосредственно, так и через индивидуальные передачи, например, ведущие колеса транспортного средства [2].

В многодвигательном приводе возникает задача распределения суммарного момента нагрузки между двигателями – выравнивания нагрузок. Для осуществления выравнивания нагрузок существуют различные методы [3]. К ним можно отнести конструктивные: подбор двигателей с близкими характеристиками, регулярный контроль состояния механической части.

Другим подходом к выравниванию нагрузок является непосредственное обеспечение равенства моментов двигателей. Простейшим

вариантом является последовательное соединение якорей двигателей постоянного тока, составляющих многодвигательный привод. К этому подходу приближается также применение двигателей с мягкой механической характеристикой. Как известно [4], возможная неравномерность распределения нагрузок снижается с уменьшением жесткости механической характеристики.

К сожалению, методы непосредственного обеспечения равенства моментов могут быть рекомендованы только для приводов с непосредственной жесткой связью между двигателями (общим валом). Для приводов с фрикционной передачей между двигателем и нагрузкой (электрический транспорт) желательна высокая жесткость механической характеристики двигателя [5, 6], тогда как мягкая характеристика повышает склонность к проскальзыванию.

Схема обобщенного многодвигательного привода

Для рассмотрения влияния различных причин неравномерного распределения нагрузок в многодвигательном приводе и способов его устранения была построена обобщенная схема многодвигательного привода, которая приведена на рис. 1.

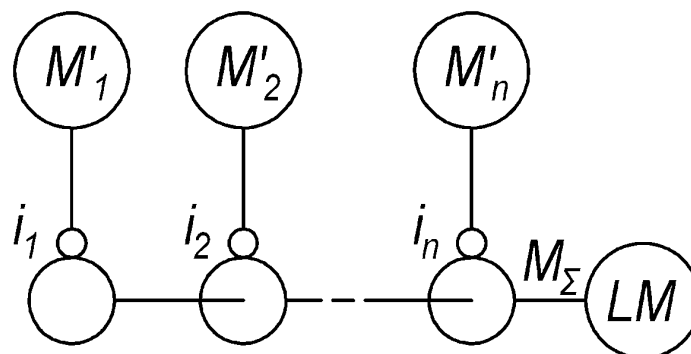


Рис. 1. – Обобщенная схема многодвигательного привода.

Схема состоит из n -каналов и общего вала (элемента), на котором суммируются моменты всех каналов. Суммарный момент передается на общую нагрузку.

Каждый канал состоит из двигателя и индивидуальной передачи между двигателем и общим валом, которая может отсутствовать. Двигатель характеризуется угловой скоростью идеального холостого хода ω_{0Di} и жесткостью механической характеристики β_{Di} , на валу двигателя развивается момент M_{Di} и скорость ω_{Di} . Вращающий момент передается на общий вал через передачу с передаточным коэффициентом u_i , в результате чего получается момент на выходе канала M_{Ki} . Передаточный коэффициент механической передачи является обобщенным параметром, примененным в связи с тем, что на выходе передачи может действовать не вращающий момент а, например, тяговое усилие.

Поскольку выходы каналов соединены общим валом (элементом), угловые скорости на них строго одинаковы и равны ω .

Математическое описание характеристик каналов

Выполним математическое описание механических характеристик каналов привода с целью последующего анализа распределения моментов. Предполагаем, что механическая характеристика двигателя имеет форму, близкую к линейной, что верно для большинства современных приводов. Механическая характеристика двигателя выражается, как:

$$M_{Di} = \beta_{Di}(\omega_{0Di} - \omega_{Di}), \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (1)$$

где M_{Di} - вращающий момент двигателя i -го канала; β_{Di} - жесткость механической характеристики двигателя i -го канала, Н·м/рад; ω_{0Di} - угловая скорость идеального холостого хода двигателя i -го канала, рад/с; ω_{Di} - текущее значение угловой скорости вала двигателя i -го канала, рад/с.

Перейдем к системе относительных единиц. В качестве базовых величин удобно использовать номинальные значения: номинальный момент двигателя $M_{\bar{\delta}} = M_{Д.ном}$, номинальную скорость идеального холостого хода $\omega_{\bar{\delta}} = \omega_{0.ном}$. В результате (1) принимает вид:

$$M_{Дi*} = \beta_{Дi} \frac{\omega_{\bar{\delta}}}{M_{\bar{\delta}}} (\omega_{0Дi*} - \omega_{Дi*}). \quad (2)$$

Для представления в относительных единицах жесткости рассмотрим ее определение для линейной механической характеристики:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = \frac{M_{ном}}{\omega_0 - \omega_{ном}}, \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}, \quad (3)$$

Другой характеристикой жесткости является номинальный статизм:

$$\delta = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0}. \quad (4)$$

Величина статизма связана с жесткостью соотношением:

$$\beta = \frac{M_{\bar{\delta}}}{\delta \omega_{\bar{\delta}}}. \quad (5)$$

Тогда выражение (2) примет вид:

$$M_{Дi*} = \frac{1}{\delta_i} (\omega_{0Дi*} - \omega_{Дi*}). \quad (6)$$

Для учета влияния отклонения жесткости на распределение моментов необходимо разделить номинальное значение статизма и его вариацию. Для этого статизм представим, как: $\delta = \delta_{\bar{\delta}} \delta_*$, где $\delta_{\bar{\delta}}$ – базовое (номинальное) значение статизма, δ_* – относительное значение статизма, которое показывает величину отклонения статизма от номинального. Учитывая (5):

$\beta_* = \frac{1}{\delta_*}$. Окончательно, из (6) получаем:

$$M_{Дi*} = \frac{1}{\delta_{\bar{\delta}}} \beta_{Дi*} (\omega_{0Дi*} - \omega_{Дi*}), \quad (7)$$

или:

$$M_{Дi*} = d\beta_{Дi*} (\omega_{0Дi*} - \omega_{Дi*}), \quad (8)$$

где $d = \frac{1}{\delta_{\delta}}$ - нормирующий коэффициент жесткости.

При наличии механической передачи соотношение между её входными и выходными параметрами описывается, как:

$$u = \frac{\omega_D}{\omega_K} = \frac{M_K}{M_D}, \quad (9)$$

где u – передаточный коэффициент механической передачи, ω_K – угловая скорость на выходе канала, M_K – момент на выходе канала.

В относительных единицах: $u = u_{\delta} u_{*}$, в качестве базового значение примем номинальное $u_{\delta} = u_{ном}$. Так как после механической передачи масштаб величин момента и угловой скорости меняется, для них следует принять новые базовые величины: $M_{K\delta} = u_{\delta} M_{\delta}$, $\omega_{K\delta} = \frac{\omega_{\delta}}{u_{\delta}}$. Учитывая

новые базовые величины и равенство (9), получим:

$$M_{Ki*} = d u_{i*} \beta_{Di*} (\omega_{Di*} - u_{i*} \omega_{*}), \quad (10)$$

где ω_{*} - относительная величина угловой скорости общего вала (элемента).

Полученные выражения (8), (10) могут быть использованы для анализа распределения момента в многодвигательном приводе, то есть отклонения момента канала от среднего значения.

Выравнивание нагрузок в многодвигательных приводах

Неравномерное распределение моментов может вызываться различием одного или нескольких параметров каналов. В общем случае, различие параметров каналов имеет место одновременно по жесткости и скорости идеального холостого хода. Кроме того, как следует из равенств (8) и (10), отклонение передаточного коэффициента механической передачи приводит к

различиям одновременно по жесткости и скорости идеального холостого хода канала.

Существуют различные варианты выравнивания моментов каналов привода. Варианты с использованием дифференциальных связей и другие, снижающие жесткость механической характеристики, применимы ограниченно. В связи с этим представляют интерес варианты получения приближения механических характеристик каналов. К таким методам можно отнести и метод подбора двигателей и других элементов с максимально близкими характеристиками. Один из недостатков метода состоит в том, что он не позволяет устранить различия, возникающие в процессе работы привода, в частности, в результате нагрева и износа элементов.

Возможно также влиять на параметры каналов привода извне, вводя корректирующие воздействия с целью получения соответственного равенства параметров каналов. Одним из вариантов такого влияния является индивидуальная коррекция напряжения, подводимого к двигателю [7, 8]. Недостаток такого метода – коррекция только по одному из параметров механической характеристики.

Перспективным вариантом выравнивания нагрузки является осуществление коррекции одновременно по двум параметрам механической характеристики – угловой скорости идеального холостого хода и жесткости, кроме того, коррекция параметров каналов привода должна в процессе его работы [9].

При реализации такого варианта возникает задача получения требуемых величин корректирующих воздействий. Сложность состоит в том, что требуется получить два корректирующих воздействия (по жесткости и по скорости идеального холостого хода), имея данные только о моментах на выходах каналов (или валах двигателей), на основании которых можно

получить данные о моменте привода в целом. Использование данных об угловой скорости не желательно, так как ее точное измерение затруднено.

Для решения задачи получения корректирующих воздействий предлагался вариант, в основе которого лежит использование режимов работы привода, близких к холостому ходу, для оценки различия каналов по скорости идеального холостого хода [9].

Недостаток такого решения состоит в потребности в режимах холостого хода, которые могут отсутствовать. Для его устранения возможно построение более сложного вычислителя, способного оценить отклонение параметров канала отдельно по каждому из параметров – наблюдателя параметров [10, 11]. Подобный наблюдатель может быть построен путем сбора данных о моментах каналов для различных нагрузок привода (значений суммарного момента).

Заключение

1. Рассмотрена проблема распределения моментов между двумя и более двигателями, работающими на общую нагрузку. Показано, что неравномерность распределения моментов возникает в результате различия индивидуальных параметров каналов привода. В общем случае требуется принятие специальных мер для равномерного распределения моментов.

2. Проведен анализ распределения моментов в многодвигательном электроприводе. Получена зависимость отклонения момента канала многодвигательного электропривода от индивидуальных параметров канала.

3. Для осуществления автоматического выравнивания моментов в многодвигательном электроприводе перспективен способ получения совпадающих механических характеристик каналов. Их получение возможно путем наложения индивидуальных корректирующих воздействий, вырабатываемых на основе анализа распределения моментов в различных режимах нагрузки привода.

Литература

1. Гейлер Л. Б. Электропривод в тяжелом машиностроении. М.: Машгиз, 1958. 587 с.
2. Кузнецов Б. А., Ярмизин В.А., Ренгевич А.А., Эренбург И.А. Транспорт на горных предприятиях. М.: Недра, 1970. 644 с.
3. Krot P. V. Dynamical processes in a multi-motor gear drive of heavy slabbing mill // Journal of Vibroengineering, Vol. 21, Issue 8, 2019, p. 2064-2081.
4. Шевченко В. И., Шевченко Г. В. Выравнивание нагрузок в многодвигательном асинхронном электроприводе // Изв. вузов. Горный журнал. 1999. №1-2. С. 168-171.
5. Минов Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электропередачей. М.: Транспорт, 1985. 267 с.
6. Фаминский Г. В. Эффективность использования локомотивов с жёсткими тяговыми характеристиками // Вестник ВНИИЖТ. 1996. №6. С. 26–29.
7. Конашинский А. Ю. Влияние электрических видов коррекции электромеханических характеристик асинхронных тяговых двигателей на их энергетические показатели. // Электровозостроение: Сб. науч. тр. ОАО «Всерос. науч.-исслед. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения» (ОАО «ВЭлНИИ»). Новочеркасск, 2000. Т. 42. С. 228 – 241.
8. Конашинский А. Ю. Особенности работы осевых приводов электроподвижного состава с параллельным питанием асинхронных тяговых двигателей. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения: науч. изд. / ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения (ОАО «ВЭлНИИ»). № 55. Новочеркасск, 2008. С. 24 – 27.
9. Волков Д. В., Сташинов Ю. П. Способ выравнивания нагрузок асинхронных тяговых двигателей электроподвижного состава. Патент на

изобретение № 2441774. Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности. 2012, № 4. URL: yandex.ru/patents/doc/RU2441774C1_20120210

10. Volkov D. V., Stashinov Yu. P. Equalization of Torques in Multi Motor Electric Drives with Estimation of Motors Parameters // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 3-4 Oct. 2018. pp. 1-5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602838

11. Volkov D. V. Variants of Equalization of Torques in Multi Motor Electric Drives // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022, pp. 425-429. Doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787281.

References

1. Gejler L. B. E`лектропривод в тязhelom mashinostroenii [Electric drive in heavy engineering]. Moskva: Mashgiz, 1958. 587 p.

2. Kuznetsov B. A., Yarmizin V.A., Rengevich A.A., E`renburg I.A. Transport na gorny`x predpriyatiyah [Transport at mining enterprises]. Mokva, Nedra, 1970. 644 p.

3. Krot P. V. Journal of Vibroengineering, Vol. 21, Issue 8, 2019, pp. 2064-2081.

4. Shevchenko V. I., Shevchenko G. V. Izvestiya vuzov. Gorny`j zhurnal. 1999. № 1-2. pp. 168–171.

5. Minov D. K. Povy`shenie tyagovy`x svoystv e`lektrovozov i teplovozov s e`lektroperedachej [Raise of traction properties of electric locomotives and diesel locomotives with electrical transmission]. Moskva, Transport, 1985. 267 p.

6. Faminskij G. V. Vestnik VNIIZhT. 1996. No. 6. pp. 26-29.

7. Konashinskij A. Yu. Vliyanie e`lektricheskix vidov korrekcii e`lektromexanicheskix xarakteristik asinxronny`x tyagovy`x dvigatelej na ix e`nergeticheskie pokazateli. E`lektrovozostroenie: Sb. nauch. tr. OAO «Vseros.



nauch.-issled. i proektno-konstrukt. in-t e`lektrovozostroeniya» (OAO «VE`INII»). Novocherkassk, 2000. vol. 42, pp. 228-241.

8. Konashinskij A. Yu. Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel`skogo i proektno-konstruktorskogo instituta e`lektrovozostroeniya: nauch. izd. OAO «Vseros. n.-i. i proektno-konstrukt. in-t e`lektrovozostroeniya (OAO «VE`INII»). Novocherkassk, 2008. vol. 55, pp. 24 – 27.

9. Volkov D. V., Stashinov Yu. P. Sposob vy`ravnivaniya nagruzok asinxronny`x tyagovy`x dvigatelej e`lektropodvizhnogo sostava [Method of load equalizing of the asynchronous traction motors of electric rolling stock]. Patent of Russia № 2441774, 2010. Publ. 10.02.2012, bull. № 4. URL: yandex.ru/patents/doc/RU2441774C1_20120210

10. Volkov D. V., Stashinov Yu. P. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 3-4 Oct. 2018. pp. 1-5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602838

11. Volkov D. V. 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022, pp. 425-429. Doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787281.