

Электромеханическое устройство для усилителя руля автомобиля

КАЛУЖСКИЙ Д.Л., ПASTУХОВ В.В., ПРУДОВ Н.М., ХАРИТОНОВ С.А., МЕХТИЕВ А.Д.

Для управления автомобилем необходимо гидравлическое или электромеханическое устройство. По мнению экспертов [1, 2], гидравлический привод по ряду причин, не отвечает современным требованиям. Электромеханический же усилитель, подключаемый к бортовому компьютеру, способен обеспечить точное воспроизведение движения руля и осуществить настройку по значению момента в зависимости от внешних факторов. Рассмотрены базовые конструкции электромеханического усилителя руля, отмечены их достоинства и недостатки. Исследования позволили спроектировать и изготовить высокомоментный электродвигатель индукторного типа, предназначенный для электромеханического управления руля автомобиля. В качестве критерия оптимальности при расчете предложено отношение $M/P^{\text{э}}$ max, где M – момент, P – электрические потери в обмотках, а в качестве ограничений – габариты машины. Приведены основные параметры разработанного электромеханизма.

Ключевые слова: электромеханическое устройство, руль автомобиля, управление, индукторный электродвигатель, параметры

Известно, что для комфортного управления автомобилем необходимо гидравлическое или электромеханическое устройство, создающее дополнительное усилие на зубчатой рейке, обеспечивающей поворот передних колес. По мнению экспертов, например [1, 2], гидравлический привод не отвечает современным требованиям, поскольку его работа связана со значительным расходом энергии (давление в масляных камерах должно поддерживаться постоянным), а качество процесса при обработке заданного угла перемещения оставляет желать лучшего. Электромеханический же усилитель, подключаемый к бортовому компьютеру, способен обеспечить точное воспроизведение движения руля и осуществить настройку по значению момента в зависимости от внешних факторов: состояния дороги, погодных условий, эргономических особенностей конкретного водителя и т.д. Кроме того, электропривод работает только при повороте автомобиля, что в сравнении с гидравликой существенно экономит потребляемую энергию и уменьшает расход топлива.

Известны две базовые конструкции электромеханического усилителя руля (ЭМУР). В первой [3], представленной на рис. 1, на зубчатую рейку пере-

даются два вращающих момента. Один из них (0–4 Нм) создается непосредственно водителем автомобиля, второй (0–0,8 Нм) – электродвигателем, работающим от блока управления. Текущее положение руля и дополнительное усилие на рейке в конструкции ЭМУР контролируют датчики момента и поворота.

Главный недостаток такой конструкции заключается в необходимости размещать электродвигатель в ограниченном пространстве под капотом, которое, кстати, трудно оградить от грязи, влаги и химических реагентов, используемых при эксплуатации дорожных покрытий. Другой недостаток – малое значение результирующего момента на рейке, поскольку в ограниченном объеме невозможно установить более мощную электрическую машину, что не позволяет использовать данный тип ЭМУР для экстремального вождения или во внедорожниках, требующих значения дополнительного момента на уровне 50–70 Нм.

Во второй конструкции ЭМУР [1, 4, 5] на рис. 2 электродвигатель устанавливается непосредственно в рулевой колодец, что устраняет необходимость занимать пространство под капотом. Усилие от рулевого колеса передается не на выходной вал, а на

and magnetic fields/Transl. from English). Moscow, Publ. «Energiya», 1970, 376 p.

5. Shtafil' M. *Elektrodinamicheskiye zadachi v elektricheskikh mashinakh i transformatorakh/Per. s cheshs.* (Electrodynamic problems in electrical machines and transformers/Transl. from Czech.). Moscow, Leningrad, Publ. «Energiya», 1966, 200 p.

6. Arakelyan A.K., Afanas'yev A.A. *Ventil'nye elektricheskkiye mashiny i reguliruyemyi elektroprivod. Kn. 1. Ventil'nye elektricheskkiye mashiny* (Velve electrical machines and regulating electrodrive. Book 1. Velve electrical machines). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1997, 509 p.

7. Afanas'yev A.A., Belov V.V., Garifullin M.F., Matveyev D.K., Mochalov D.O., Nikolayev A.V., Chikhnyayev V.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2010, No. 6, pp. 35–38.

8. Ivanov-Smolenskii A.V., Abramkin Yu.V., Vlasov A.I., Kuznetsov V.A. *Universal'nyi metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v elektricheskikh mashinakh/Pod red. A.V. Ivanova-Smolenskogo* (Universal method of electromagnetic processes calculation in electrical machines/Edit. by A.V. Ivanov-Smolenskii). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1986, 216.



Рис. 1

торсион, угол закручивания которого определяется разностью моментов на поворотной рейке и на входном валу и преобразуется в электрический сигнал датчиком момента. Угол поворота выходного вала фиксируется датчиком положения (ДП), улавливающего торцевые потоки рассеяния от постоянных магнитов на роторе датчиками Холла. Таким образом, ДП выполняет две функции: служит для управления синхронным двигателем; используется в контуре обратной связи по положению руля.

Двигатель, выполненный согласно [6], представляет собой синхронную машину с постоянными магнитами на роторе и дискретно-распределенной обмоткой на статоре. При общей потребляемой мощности 600 Вт он в режиме короткого замыкания создает момент 24–26 Нм, а при частоте вращения 130 об/мин – до 19,4 Нм.

Вместе с тем, несмотря на многочисленные положительные отзывы, вполне однозначно можно утверждать, что ЭМУР с прямым приводом полностью исчерпал свои возможности и не может использоваться во внедорожниках или для экстремального вождения, что в последнее время приобретает все большую популярность. Дело в том, что размеры рулевого колодца ограничены, а спроектировать в тех же габаритах электрическую машину с моментом, в 2,5–3,0 раза большим, нереально, учитывая ограничения на потребление электроэнергии. Вероятность же применения редуктора в данной ситуации также представляется неоднозначной. Например, редуктор с цилиндрическими передачами невозможно использовать принципиально, поскольку торсион датчика момента должен быть закреплен между выходным валом редуктора и валом рулевого колеса, а все это пространство будет заполнено не соосно размещенными шестернями.

Соосное с двигателем размещение планетарного редуктора, на первый взгляд, не представляет особых проблем. Действительно, планетарная переда-

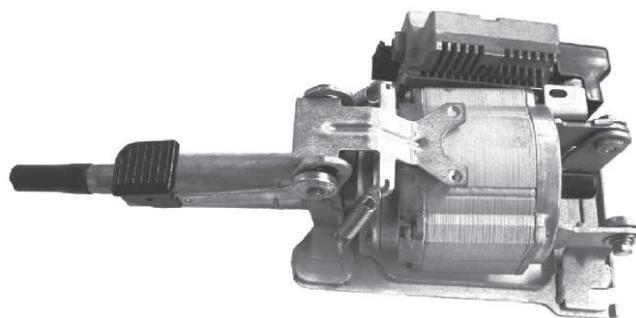


Рис. 2

ча в сравнении с редуктором, в котором используются цилиндрические шестерни [7], имеет удельный момент, в 3–4 раза больший, и в зависимости от габаритов и передаточного отношения j может достигать значений от 10 до 120 Нм/кг. Соответственно, уменьшив длину пакета статора (или значенный момента двигателя) вдвое и высвободив таким образом 35–40% внутреннего объема машины, можно «легко» поместить туда редуктор с отношением $j=4,5–5$. Однако на практике реализовать такую идею можно только за счет увеличения внутреннего диаметра ротора.

Дело в том, что выходной вал редуктора, проходящий по всей длине электрической машины, и втулка, на которой расположен ротор, вращаются с разными частотами и должны быть разделены подшипниками. Увеличение же внутреннего диаметра ротора (при неизменном диаметре расточки) неизбежно повлечет уменьшение основного потока, созданного магнитами, или снижение момента двигателя. Предварительные расчеты и конструкторская проработка ЭМУР показали: при фиксированных габаритах и энергопотреблении использование планетарного редуктора и соосно размещенного с ним синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе не дает заметного выигрыша по значению момента.

Таким образом, решить поставленную задачу, т.е. довести значение дополнительного момента $M_{эм}$ на рейке рулевого управления до 50–70 Нм, можно при одном условии, а именно, создав двигатель, полностью соответствующий нижеперечисленным техническим требованиям:

коэффициент использования активного объема $M_{эм} / (D_a^2 L_a)$ — не менее 45 кДж/м²;

удельный момент $M_{эм} / G \leq 7$ Нм/кг;

частота вращения — до 750 об/мин;

потери в стали магнитопровода и в обмотках — минимальны;

отношение внутреннего диаметра ротора к диаметру расточки $D_{вн} / D_a \rightarrow \max$.

Оценим технические возможности электрических машин на предмет их соответствия этим тре-

бованиям. Пусть наружный диаметр, активная длина L_a , высота ярма, диаметр расточки, число пар полюсов и электрические потери в обмотках у всех машин одинаковые. Если поле возбуждения $B(a,t)$ и МДС якоря распределенной обмотки $F_a(a,t)$ можно адекватно описать только основной гармоникой, воздушный зазор считать равномерным, а зубчатость статора и ротора учесть коэффициентом воздушного зазора K_d , то, пренебрегая скосом пазов и считая, что радиус ротора $R_a > dK_d$, можно представить энергию магнитного поля в виде:

$$W_{эм} = \frac{1}{2} \int_0^{R_1+dK_d} \int_0^{L_a} \int_0^{2p} B(a,q)H(a,t)r dr dy da. \quad (1)$$

Выполнив необходимые операции и продифференцировав данное выражение по углу поворота ротора, найдем электромагнитный момент:

$$M_{эм1} = 0,25ppD_aL_aB_mF_{m1} \sin(pq_0). \quad (2)$$

Учтем тепловой фактор. Синхронная машина с постоянными магнитами и распределенной обмоткой на статоре создает электрические потери:

$$P_{эл1} = mI^2r = \tau mI_m^2 w_1 L_B / (2S_{пр}), \quad (3)$$

где w_1 — число витков в фазе; L_B — длина витка; $S_{пр}$ — сечение проводника.

Преобразуя данное выражение с использованием новых параметров: плотности тока j_{m1} , диаметра, проведенного до дна паза D , коэффициента уменьшения лобовой части длины витка b_{y1} , в окончательном виде получим:

$$P_{эл1} = \frac{p\tau^3}{163} 2L_a + \frac{p^2 D_a b_{y1}}{2p} \frac{\psi}{\chi} j_{m1}^2 k_{31} (D^2 - D_a^2) k_1, \quad (4)$$

где k_1 — коэффициент, устанавливающий связь между площадью одного паза и суммой площадей пазов в пределах фазной зоны.

Рассмотрим параметры синхронной машины с постоянными магнитами на роторе и обмоткой, выполненной с зубцовым шагом по аналогии с [6], уложенной в z_{11} пазов статора. Ее МДС в первом приближении можно представить как

$$F_a(a,t) = 0,5F_{m2} \cos \frac{\psi}{\chi} w_1 t - \frac{z_{11} + n}{2} a \frac{\psi}{b_1} + 0,5F_{m2} \cos \frac{\psi}{\chi} w_1 t + \frac{z_{11} - n}{2} b \frac{\psi}{b_1} \quad (5)$$

Любая из этих гармоник может взаимодействовать с полем возбуждения, т.е. $p = (z_{11} \pm n)/2$. Выполнив операции интегрирования по аналогии с (1), получим:

$$M_{эм2} = \frac{(z_{11} \pm n)pD_aL_aB_mF_{m2}}{16} \sin(pq_0); \quad (6)$$

$$P_{эл2} = \frac{p\tau^3}{163} 2L_a + \frac{p^2 D_a b_{y2}}{z_{11} \pm n} \frac{\psi}{\chi} j_{m2}^2 k_{32} (D^2 - D_a^2) k_2 \quad (7)$$

Сравним (4) и (7). С большой долей достоверности можно принять, что коэффициенты k_1 и k_2 для обеих машин одинаковые. Знаменатель в скобке выражения (7) представляет собой число полюсов. Коэффициент укорочения длины лобовой части витка в дискретно-распределенной обмотке меньше, нежели в распределенной. Это связано с тем, что в двигателях военной и аэрокосмической техники для уменьшения массы и электрических и потерь катушки дискретно-распределенной обмотки (ДРО) [8] наматываются непосредственно на зубец, тогда как катушки распределенной обмотки наматываются на шаблон и укладываются в пазы вручную. Соответственно, при расчетах обычно принимают $b_{y1} = 0,8-0,85$, а $b_{y2} = 0,65-0,7$. Однако в первом приближении можно принять, что данные коэффициенты равны между собой и, следовательно, при одинаковых электрических потерях и плотности тока в каждом рассматриваемом случае будут одинаковыми.

Сделаем оговорку. В машине с распределенной обмоткой площадь паза $S_{п1} = p(D^2 - D_a^2)k_1 / (8mpq)$, а в машине, обмотка которой выполнена с зубцовым шагом, $S_{п2} = p(D^2 - D_a^2) / 4(2p \pm n)$, т.е. примерно в три раза больше при условии, что двигатели имеют трехфазное исполнение. С учетом особенностей технологии обмоточных работ коэффициент заполнения паза медью k_{32} можно принять равным 0,35–0,40, в то время как значение k_{31} редко превышает 0,25. Таким образом, при одинаковых электрических потерях плотность тока в машине с зубцовым шагом может быть снижена на 30%, а произведение плотности тока на k_{32} у нее примерно на 30% больше.

Сравним значения моментов. Максимальное значение МДС распределенной обмотки с $q=1$ примерно равно МДС одного паза, максимальное значение можно представить в виде

$$F_{m2} = 0,5S_{п2}k_{32}j_{m2}. \quad (8)$$

Тогда с учетом (2) и (6) отношение моментов будет равно:

$$\frac{M_{эм2}}{M_{эм1}} = \frac{p}{4} \frac{2p}{2p \pm n} \frac{j_{m2}k_{32}}{j_{m1}k_{31}}. \quad (9)$$

Можно предположить, что при достаточно большом значении числа пар полюсов электриче-

Число пар полюсов p	Отношение моментов при η , равном					
	1	2	3	-1	-2	-3
3	0,67	—	—	0,94	1,18	—
4	0,69	—	—	0,89	1,05	—
5	0,71	0,65	—	0,87	0,98	1,12
6	0,72	0,67	—	0,86	0,94	1,05
7	0,73	0,69	0,65	0,85	0,92	0,99

ские машины с ДРО проигрывают в значении момента традиционным двигателям с распределенными обмотками. Действительно, если $j_{m2}k_{32} \gg j_{m1}k_{31}$, $M_{\Sigma 2} / M_{\Sigma 1} \gg p/4 = 0,785$.

В таблице представлены отношения моментов двигателей с распределенными и дискретно-распределенными обмотками, рассчитанные при условии, что произведение плотности тока на коэффициент заполнения паза медью в обоих случаях одинаково. Анализируя данные таблицы, нетрудно установить: даже без учета возможного повышения МДС обмотка с зубцовым шагом позволяет в ряде случаев добиться увеличения момента. Если же каждое значение в таблице дополнительно умножить на 1,25–1,30 (см. выше), то преимущество ДРО при проектировании высокомоментных двигателей выглядит еще более весомым.

Сравним возможности синхронной машины с постоянными магнитами на роторе и индукторной. После возбуждения индукторной машины с распределенной обмоткой на статоре и кольцевым магнитом на роторе будет определяться отношением

$$B_{m1} = bB_{m0} \cos(z_2 q - \pi a), \quad (10)$$

где B_{m0} — постоянная составляющая магнитной индукции, обусловленная потоком магнитов; $b = 0,4-0,6$ — коэффициент пульсации магнитной проводимости воздушного зазора. Отметим, что в рассматриваемой машине число периодов изменения магнитной проводимости равно числу пар полюсов $p = \eta$. Подставив (10) в уравнение энергии и продифференцировав результат по углу поворота ротора, получим выражение момента:

$$M_{\Sigma 11} = 0,25 z_2 b p D_a L_a B_{m0} F_{m1} \sin(z_2 q_0). \quad (11)$$

Число зубцов ротора и число пар полюсов в индукторной машине с аксиальным возбуждением связано соотношением

$$z_2 = 2mpq \pm p = p(2mq \pm 1). \quad (12)$$

Если принять, что во всех рассматриваемых машинах поля возбуждения одинаковые, то при неиз-

менных габаритах, электрических потерях, значениях числа пар полюсов и плотности тока справедливо

$$M_{\Sigma 11} / M_{\Sigma 1} = b(2mq \pm 1) \gg 2,0-4,2, \quad (13)$$

что полностью согласуется с ранее полученными результатами, например в [9].

Сравним две индукторные машины с независимым возбуждением от постоянных магнитов при условии, что у одной из машин на статоре расположена распределенная обмотка, а у другой — обмотка с зубцовым шагом [10]. Для упрощения анализа представим поле возбуждения и МДС в виде идеализированных дискретных функций, как это сделано в [11]. Здесь в отличие от (5) рабочая гармоника МДС якоря F_{m21} имеет амплитуду, соизмеримую с F_{m2} . Так, в наиболее распространенной конструкции трехфазного индукторного двигателя с двенадцатью большими зубцами на статоре значение $F_{m21} = \frac{3}{p} F_{m2}$, что всего на 5% меньше максимального значения МДС, которую создает катушка с зубцовым шагом.

Если не касаться особенностей проектирования магнитной системы и принять, что основная гармоника поля такая же, как и в ранее рассмотренных случаях, то

$$M_{\Sigma 22} = \frac{z_2 b p D_a L_a B_{m0} F_{m21} z_s}{4(z_s + k)} \sin(z_2 q_0), \quad (14)$$

где F_{m21} определяется из (8), а

$$z_2 = 2p(z_s + k) \pm \eta(z_s + k + 1).$$

Используя ранее полученные выражения, найдем отношение моментов индукторного двигателя с ДРО и синхронной машины с постоянными магнитами на роторе:

$$M_{\Sigma 22} / M_{\Sigma 1} = \frac{12 b z_s}{p(z_s + k)} \eta (z_s + k) \pm \frac{1}{2p \pm \eta} \frac{12 b}{p} z_s, \quad (15)$$

где z_s исходя из рекомендаций по выбору геометрии зубцово-пазовой зоны [11] принимает значения от трех до шести, а значения k — целые числа 0, 1, 2.

Таким образом, в линейной постановке задачи момент индукторного двигателя выше, чем у синхронной машины с магнитами в (4,6–6) раз. Это дает основание утверждать, что предлагаемый двигатель имеет солидные технические преимущества перед прочими типами электрических машин и может рассматриваться в качестве базового варианта при проектировании ЭМУР с соосной планетарной передачей.

Наиболее известным представителем такого класса электрических машин является двухфазный шаговый двигатель с электромагнитной редукцией скорости, выполненный согласно [12]. Двигатель содержит зубчатые двухпакетные ротор и статор. Между пакетами ротора расположен кольцевой магнит, создающий в пределах каждой половины машины униполярный магнитный поток. На статоре имеется восемь больших зубцов, на внутренней поверхности которых располагаются элементарные зубцы с зубцовым делением t_{z1} , близким или равным зубцовому делению на роторе t_{z2} . Катушки, принадлежащие фазе *A*, размещены на больших зубцах статора, геометрический угол между которыми равен 90° . Остальные 4 зубца с катушками принадлежат фазе *B*. Если на фазу *A* подается положительное напряжение, то под двумя диаметрально расположенными большими зубцами униполярное поле усиливается, а под большими зубцами, смещенными на угол 90° , — ослабляется.

При соответствующем подборе числа элементарных зубцов на статоре и роторе (z_1 и z_2) вращающаяся часть электрической машины в магнитном отношении представляет собой ферромагнитную болванку эллиптической формы. Понятно, что такой «ротор» будет стремиться занять положение, при котором минимальный воздушный зазор был бы в той области, где магнитное поле максимально. При смене полярности напряжения на фазе *A* «ротор» повернется на 90° или на $t_{z2} / 4$. Промежуточные положения, кратные $t_{z2} / 8$, отрабатываются за счет отключения фазы *A* от источника питания и при соответствующих коммутациях в фазе *B*.

В рассмотренной конструкции можно выделить несколько негативных факторов:

для создания большого униполярного потока необходимо до предела повысить отношение диаметра расточки к внутреннему диаметру ротора. В противном случае нужно уменьшать длину каждого пакета статора (ротора) или создавать многопакетную конструкцию. Однако такой шаг повлечет за собой относительное увеличение нерабочих зон (между пакетами) и, как следствие, снижение удельного момента;

для замыкания униполярного потока по статору необходим массивный ферромагнитный корпус. (Для устранения этого негативного фактора французская фирма SAGEM делает пакеты статора нешихтованными, но ограничивает максимальную частоту вращения до 18–20 об/мин);

при малом сечении паза невозможно создать необходимый поток якоря, поскольку он замыкается по длинному пути (четверти длины окружности) с большим магнитным сопротивлением. Дополнительное снижение обусловлено ответвлением маг-

нитных силовых линий в области, в которых отсутствуют токи.

Для устранения указанных недостатков в двигателе для ЭМУР необходимо: разместить постоянные магниты, создающие радиальный поток на статоре; объединить катушки, принадлежащие одной фазе, на изолированных в магнитном отношении сегментах.

Поставленные задачи в полной мере решены в конструкции электродвигателя, выполненной согласно [13] — рис. 3. Пакет статора поделен на $2mk$ ($k = 1, 2, 3, \dots$ — целое число) сегментов, на каждом из которых находятся большие зубцы с катушками, принадлежащие одной фазе. Катушки включаются согласно, чтобы взаимно усилить магнитные потоки друг друга. Между сегментами располагаются постоянные магниты, создающие в пределах сегмента радиальное поле возбуждения одной полярности. Таким образом, если одна катушка усиливает результирующее поле, то другая — ослабляет его.

В отличие от двухфазного аналога, рассмотренного выше, здесь благодаря магнитной изоляции сегментов поле якоря ослабляется только за счет потоков рассеяния и, как показывают расчеты, оказывается больше на 10–15% поля под большими зубцами. Другая положительная особенность двигателя в том, что потоки возбуждения и якоря замыкаются по разным участкам ярм и сходятся вместе только в «нужных местах» — воздушном зазоре и большом зубце. Например, поток возбуждения от верхнего магнита на рис. 3 замыкается по большим зубцам *1*, *12* и участкам ярм между ними, а поток якоря — только по большим зубцам *1*, *2* и участкам ярм между ними. Это позволяет предельно уменьшить высоту ярма и обеспечить выполнение одного из критериев оптимального проектирования ЭМУР $D_{вн} / D_a \text{ ® max}$.

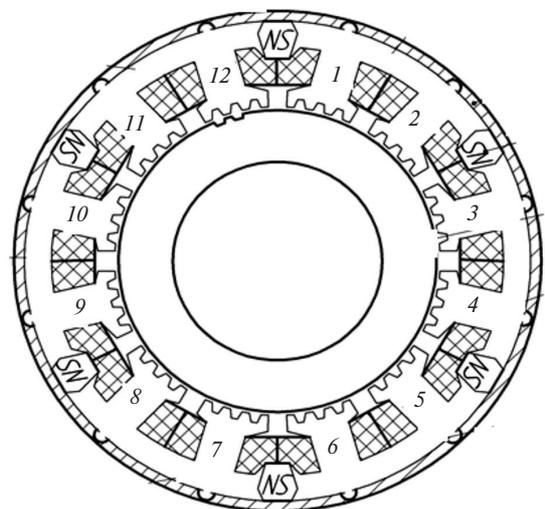


Рис. 3

Немаловажным представляется и отсутствие униполярного потока (магнитопровода) в рассматриваемой машине вследствие радиального расположения постоянных магнитов. С одной стороны, это упрощает конструкцию, а с другой, обеспечивает требуемый диапазон частоты вращения вала двигателя (0–700 об/мин) при частотах питающего напряжения до 750 Гц.

Отметим и главную особенность двигателя — отсутствие вращающегося магнитного поля, что, на первый взгляд, противоречит фундаментальным положениям общей теории электрических машин. Объясняется этот «парадокс» следующим образом. Выделим в двигателе большие зубцы (сегменты), в пределах которых поле возбуждения имеет одинаковое направление: 1, 2 — фаза А; 5, 6 — фаза С; 9, 10 — фаза В. Пусть при фиксированном положении ротора магнитная проводимость воздушного зазора в пределах каждого большого зубца определена так, как показано на рис. 4, и обеспечивается различным расстоянием между соседними элементарными зубцами, расположенными на разных больших

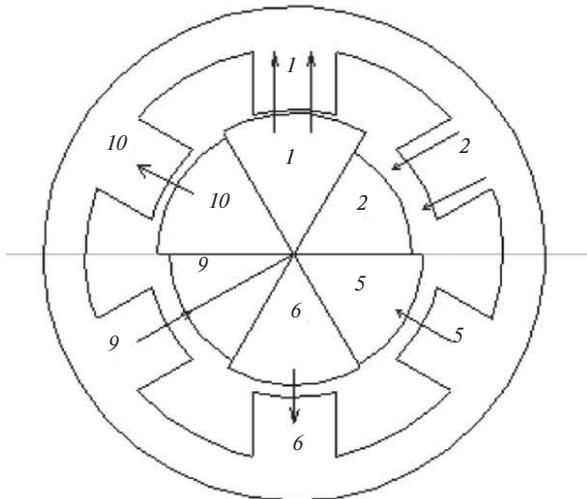


Рис. 4

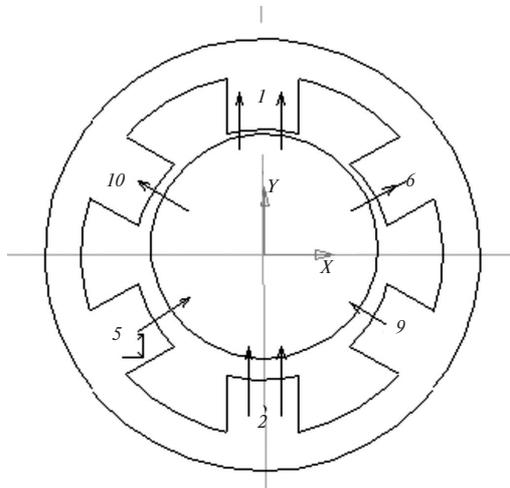


Рис. 5

зубцах. При этом можно считать, что в пределах каждого большого зубца вращается «свой ротор» с частотой $z_2 \omega_p$, представляющий собой ферромагнитный цилиндр, расположенный с эксцентриситетом относительно статора и имеющий «свою начальную фазу». Если мысленно разрезать такую машину на шесть частей и соответствующим образом переставить отдельные фрагменты, то математический аналог реального двигателя будет выглядеть так, как показано на рис. 5.

Анализируя модели, представленные на рис. 4 и 5, можно сделать следующие выводы:

вращающиеся волны МДС и магнитной проводимости $l(q, a)$ на рис. 5 заменены пульсирующими волнами, действующими в пределах каждой фазы на рис. 4. При этом пространственные и временные характеристики $F(a, t)$ и $l(q, a)$ в пределах каждого большого зубца остаются неизменными;

электрическая машина на рис. 5 имеет все недостатки двухфазного шагового двигателя и, несомненно, проигрывает по своим техническим характеристикам двигателю на рис. 4, но в линейной постановке задачи оказывается тождественной ему;

уравнения собственных и взаимных индуктивностей для математической модели (рис. 5) аналогичны тем, что выведены ранее в [14].

Для вывода уравнений напряжений и момента воспользуемся модифицированными функциями Радемахера, основные понятия о которых, а также методы расчета индуктивностей с их помощью изложены в [15]. После проведения необходимых математических операций выражения для собственных и взаимных (относительно «обмотки возбуждения») индуктивностей получим в виде:

$$L_0 = \frac{m_0 \rho D_a L_a w_1^2}{2 m d K_d}; \tag{16}$$

$$L_{k0} = \frac{m_0 b \rho D_a L_a w_1 w_0 \gamma}{2 m d K_d} \frac{1}{k} \cos z_2 \varphi - \frac{2 \rho}{m} (k-1) \frac{\psi}{B_1} \tag{17}$$

где $m = 3, 5, 7, \dots$ — число фаз; $k = 1, 2, 3, \dots$ — целое положительное число.

Выполнив преобразования с использованием метода симметричных составляющих и приняв для установившегося режима работы $p=0$, $z_2 \omega_p = \omega_1$, получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_+ &= r_1 \dot{I}_+ + j \omega_1 L_0 \dot{I}_+ + j \omega_1 \frac{\sqrt{m}}{2} i_r b L_0 e^{j q_H}; \\ \dot{U}_- &= r_1 \dot{I}_- - j \omega_1 L_0 \dot{I}_- - j \omega_1 \frac{\sqrt{m}}{2} i_r b L_0 e^{j q_H}; \\ U_{f0} &= r_{f0} i_r; \end{aligned} \tag{18}$$

$$M = \frac{\sqrt{m}}{2} z_2 b L_0 i_r [j \dot{I}_+ e^{j q_H} + j \dot{I}_- e^{-j q_H}] =$$

$$= \frac{z_2 m U_m i_r b L_0 (r_1 \sin \varphi_H - w_1 L_0 \cos \varphi_H)}{2[r_1^2 + (w_1 L_0)^2]} \quad (19)$$

Выражения (18), (19) выведены для случая, когда вместо постоянных магнитов радиальный поток возбуждения создает обмотка с числом витков w_0 . Если в машине используются магниты, то рассматривается потокоцепление $y_m = b L_0 i_r$.

Исследования позволили спроектировать и изготовить высокомоментный электродвигатель индукторного типа, предназначенный для работы в составе ЭМУР. В качестве критерия оптимальности при расчете была предложена функция $M/P \text{ @ max}$, где P – электрические потери в обмотках, а в качестве ограничений – габариты электрической машины. Ниже приведены основные параметры электромеханизма:

- номинальный момент 32 Нм;
- максимальный момент 64 Нм;
- номинальные электрические потери 35 Вт;
- максимальные электрические потери при пуске 350 Вт;
- максимальная потребляемая мощность 600 Вт;
- номинальная частота вращения выходного вала 60 об/мин;
- максимальная частота вращения выходного вала 130 об/мин;
- наружная длина 100 мм;
- наружный диаметр 126 мм;
- передаточное отношение 4,95;
- масса 4,3 кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харитонов С.А., Боченков Б.М., Шевченко А.Ф. и др. Электромеханический усилитель руля автомобиля. — Труды V Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». — Новосибирск, 2000, т. 4, с. 144–146.
2. Taran A.V., Frantsuzova G.A., Kharitonov S.A. Control System of Electric Power Steering. — Proceedings of the IASTED International Conf. «Automation, Control, and Information Technology». Novosibirsk, 2002, pp. 121–124.
3. <http://www.newsomelaw.com/blog/2015/01/07/ready-another-recall-nhtsa-investigating-ford-more-power-steering-problems>. Retrieved 2015-02-20. Missing or empty |title= (help)
4. Патент на полезную модель № 12706 РФ). Электромеханический усилитель руля автомобиля/С.А. Харитонов, Б.М. Боченко, А.Ф. Шевченко, В.В. Жуловян, А.В.Таран, О.Б. Мухин, И.Е. Деряжный. — Бюлл., 2000, № 3.
5. Патент РФ № 2278797. Электромеханический усилитель руля автомобиля и электродвигатель для усилителя руля/А.Ф. Шевченко. Оpubл. 19.08.2005.
6. А.с. № 1481875 (СССР). Синхронный электродвигатель/В.В. Жуловян, Н.М. Гераскина, Д.Л. Калужский и др. — БИ, 1989, № 19.
7. Антонов А.С., Артамонов Б.А., Коробков Б.М. Планетарные передачи. Танк. — М.: Воениздат, 1954, с. 422–607.

8. Веселовский О.Н., Калужский Д.Л. Уравнения электрического равновесия и момента синхронных и асинхронных двигателей с дискретно-распределенными обмотками. — Электричество, 2000, № 5, с. 31 – 36.

9. Калужский Д.Л., Стрижков А.М., Галимзянов А.Т. Сравнительный анализ высокомоментных двигателей. — Сб. научных трудов Уральского федерального университета им. Б.Н. Ельцина, 2011, 329 с.

10. Калужский Д.Л., Веселовский О.Н. Индукторный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов. — Сб. докладов Международной конференции UEEES. — С.-Петербург, 2004, т. 1, с. 92 – 98.

11. Калужский Д.Л., Стрижков А.М., Харитонов С.А. Уравнения электрического равновесия и момента индукторного двигателя реактивного типа. — Электричество, 2010, № 5, с. 43 – 48.

12. Патент Японии № 61–14743. Электрическая машина. Заявитель Мацусита дэнки сангё, 1989.

13. Патент на полезную модель № 125414. Синхронный индукторный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов/Д.Л. Калужский, В.В. Пастухов, Н.М. Прудов. Оpubл. 05.06.2012.

14. Калужский Д.Л. Электрические машины с дискретно-распределенными обмотками. — Электротехника, 1997, № 9, с. 5–10.

15. Калужский Д.Л., Стрижков А.М., Галимзянов А.Т. Уравнения электрического равновесия и момента двухфазного индукторного двигателя. — Электричество, 2010, № 8, с. 59–63.

[03.08.15]

Авторы: Калужский Дмитрий Леонидович окончил электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института (НЭТИ) в 1980 г. В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Электрические машины с дискретно-распределенными обмотками». в Уральском государственном техническом университете (УГТУ–УПИ). Профессор кафедры «Электроника и электротехника» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ–НЭТИ).

Пастухов Владимир Викторович окончил электромеханический факультет НЭТИ в 1974 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию «Переходные процессы в индукторном двигателе двойного питания» в УГТУ–УПИ. Скончался в 2015 г.

Прудов Николай Михайлович – технический директор ПАО ДААЗ (г. Димитровград). Генеральный директор ООО «НПП Инж – К». Скончался в 2015 г.

Харитонов Сергей Александрович окончил факультет «Электронные приборы» НЭТИ в 1974 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Системы генерирования электрической энергии для ветроэнергетики и автономных подвижных объектов. (Анализ и синтез)» в НГТУ–НЭТИ. Профессор, заведующий кафедрой «Электроника и электротехника» НГТУ–НЭТИ.

Мехтиев Али Джаваниширович в 1999 г. окончил Карагандинский государственный технический университет (КарГТУ). В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию. Заведующий кафедрой «Технологии и системы связи» КарГТУ.

An Electromechanical Device for a Car Steering Booster

Kaluzhskii Dmitrii Leonidovich (Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

Pastukhov Vladimir Viktorovich (NSTU, Novosibirsk, Russia) – Cand. Sci. (Eng.). He died in 2015

Prudov Nikolai Mikhailovich (LLC «NPP Inzh–K», Dmitrovgrad, Russia) – Director General. He died in 2015

Kharitonov Sergei Aleksandrovich (NSTU, Novosibirsk, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

A hydraulic or an electromechanical device is necessary for steering a car. In the opinion of experts [1, 2], a hydraulic drive does not meet the modern requirements for a number of reasons. On the other hand, an electromechanical steering booster connected to the on-board computer is able to exactly replicate the steering wheel motion and to make adjustment based on the value of torque depending on the external factors. Basic designs of an electromechanical steering booster are considered, and their advantages and drawbacks are pointed out. As a result of the performed investigations, it has become possible to design and manufacture a high-torque inductor-type electric motor intended for electromechanically controlling the car steering wheel. The following relation is proposed as the optimality criterion in calculations: M/P -max, where M is the torque, P is the electric power loss in the windings, and the car overall dimensions are used as constraints. The main parameters of the developed electrical actuator are given.

Key words: electromechanical device, steering wheel, car, control, inductor electric motor, parameters

REFERENCES

1. **Kharitonov S.A., Bochenkov B.M., Shevchenko A.F. et al.** *Trudy V Mezhdunarodnoi konf. «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroyeniya – in Russ.* (Proc. of the V Intern. conf. «Actual problems of electronic of instrument making»). Novosibirsk, 2000, vol. 4, pp. 144–146.
2. **Taran A.V., Frantsuzova G.A., Kharitonov S.A.** Control System of Electric Power Steering. — Proceedings of the IASTED International Conf. «Automation, Control, and Information Technology». Novosibirsk, 2002, pp. 121–124.
3. <http://www.newsomelaw.com/blog/2015/01/07/ready-another-recall-nhtsa-investigating-ford-more-power-steering-problems>. Retrieved 2015-02-20. Missing or empty |title= (help)
4. **Patent na poleznuyu model' No. 12706 (RF).** *Elektromekhanicheskii usilitel' rulya avtomobilya* (Utility patent No. 12706 (RF). Electromechanical power steering)/S.A.Kharitonov, B.M. Bochenko, A.F. Shevchenko, V.V. Zhulovyan, A.V. Taran, O.B. Mukhin, I.E. Deryazhnyi. Bulletin of inventions, 2003, No. 3.
5. **Patent RF No. 2278797.** *Elektromekhanicheskii usilitel' rulya avtomobilya i elektrodvigatel' dlya usilitelya rulya* (Electromechanical power steering and electric vehicle for power steering)/A.F. Shevchenko. Publ. 19.08.2005.
6. **A.s. No. 1481875 (SSSR).** *Sinkhronnyi elektrodvigatel'* (Synchronous electric motor)/V.V. Zhulovyan, N.M. Geraskin, D.L. Kaluzhskii et al. Bulletin of inventions, 1989, No. 19.
7. **Antonov A.S., Artamonov B.A., Korobkov B.M.** *Planetarnyye peredachi. Tank* (Planetary transmission. Tank). Moscow, Publ. Voenizdat, 1954, pp. 422–607.
8. **Veselovskii O.N., Kaluzhskii D.L.** *Elektrichestvo – in Russ.* (Electricity), 2000, No. 5, pp. 31–36.
9. **Kaluzhskii D.L., Strizhkov A.M., Galimzyanov A.T.** *Sravnitel'nyi analiz vysokomomentnykh dvigatelei. Sbornik nauchnykh trudov Ural'skogo federal'nogo universiteta* (Comparative analysis of torque motors. Collection of scientific reports of Ural Federal University), 2011, 329 p.
10. **Kaluzhskii D.L., Veselovskii O.N.** *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoi konf. UEES* (Proceedings of Intern. conf. UEES). St. Petersburg, 2004, vol. 1, pp. 92–98.
11. **Kaluzhskii D.L., Strizhkov A.M., Kharitonov S.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2010, No. 5, pp. 43–48.
12. **Patent No. 61–14743 (Japan).** *Elektricheskaya mashina* (Electrical machine)/Denki sange Matsusita, 1989.
13. **Patent na poleznuyu model' No. 125414.** *Sinkhronnyi induktorny dvigatel' s vzbuzhdeniyem ot postoyannykh magnitov* (Utility patent No. 125414. Inductor synchronous motor with permanent magnet)/D.L. Kaluzhskii, V.V. Pastukhov, N.M. Prudov. Publ. 05.06.2012.
14. **Kaluzhskii D.L.** *Elektrotehnika – in Russ (Electrical Engineering)*, 1997, No. 9, pp. 5–10.
15. **Kaluzhskii D.L., Strizhkov A.M., Galimzyanov A.T.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2010, No. 8, pp. 59–63.