

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕМИФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

П.Г. Вигриянов

(Филиал Южно-Уральского государственного университета, г. Златоуст)

Приведены результаты расчёта энергетических характеристик семифазных вентильных двигателей (ВД) малой мощности с гальванически развязанными фазами обмотки якоря в нормальных и аварийных режимах работы при полной коммутации. Проведена количественная оценка влияния четырёх видов отказов элементов силовой части ВД на энергетические характеристики. Предложены некоторые варианты исключения неблагоприятных отказов на этапе проектирования ВД и критерии оценки работоспособного состояния двигателей при отказах элементов силовой части.

Ключевые слова: семифазный вентильный двигатель, отказы элементов, энергетические характеристики, обрыв силового ключа полупроводникового коммутатора, короткое замыкание силового ключа полупроводникового коммутатора, короткое замыкание фазы электромеханического преобразователя, обрыв фазы электромеханического преобразователя, работоспособность двигателя.

Успехи в развитии полупроводниковой техники обеспечивают возможность выполнения достаточно надёжных и экономичных управляемых преобразователей. Они явились толчком к широкому внедрению вентильных электроприводов малой мощности во многих отраслях промышленности и техники: в системах управления полётом, космических и промышленных роботах, манипуляторах, металлорежущих станках, медицине, устройствах звукозаписи и видеозаписи [1 – 6].

Исполнительным элементом этих приводов является вентильный двигатель (ВД) постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов [1, 3, 6]. По сравнению с другими типами электрических машин он обладает значительными преимуществами, такими как отсутствие скользящего контакта; хорошая управляемость, хорошие энергетические, массогабаритные и динамические показатели; работа без обслуживания; относительная простота схем полупроводниковых коммутаторов и систем управления [2, 3, 6, 7].

Обеспечение максимальной надёжности таких двигателей систем автоматики всегда являлось основным требованием при разработке электроприводов. В настоящее время к машинам этого класса предъявляются повышенные требования к показателям надёжности. Поскольку, согласно теории надёжности, двигатели систем автоматики относятся к невосстанавливаемым изделиям, то чаще всего такими показателями являются вероятность безотказной работы ($p = 0,9950 - 0,9999$), срок сохраняемости (до 100 000 ч) и наработка до отказа (12 000 – 15 000 ч). Выполнение таких требований может быть достигнуто разработкой новых схем

двигателей и способов их резервирования. Повышение надёжности машин в этих случаях достигается путём обеспечения какого-либо вида избыточности: структурной, функциональной, алгоритмической [8, 9].

Наиболее перспективными исполнительными элементами электропривода являются ВД постоянного тока за счёт высокой надёжности и широких возможностей для резервирования [10, 11]. Увеличение числа фаз электромеханического преобразователя (ЭМП) такого двигателя обеспечивает не только структурную избыточность, но и даёт возможность управления коммутационными процессами, т. е. создаёт алгоритмическую избыточность. Совокупность этих двух факторов позволяет в случае отказов элементов обеспечить работоспособное состояние многофазного двигателя и снизить степень влияния отказа на выходные координаты машины путём изменения величины питающего напряжения, алгоритмов коммутации фаз обмотки или угла управления коммутацией. Для выбора способа воздействия (или совокупности нескольких способов) необходимо, прежде всего, выяснить влияние каждого отказа на энергетические параметры многофазного ВД для выбранной схемы машины при отсутствии каких-либо изменений в условиях работы.

Предположим, что проведённый анализ показал, что для обеспечения требуемых показателей надёжности для выбранной схемы машины при любом отказе элементов электромеханический преобразователь должен иметь семь фаз обмотки якоря. Теперь для оценки работоспособности машины требуется выяснить влияние каждого из возможных отказов

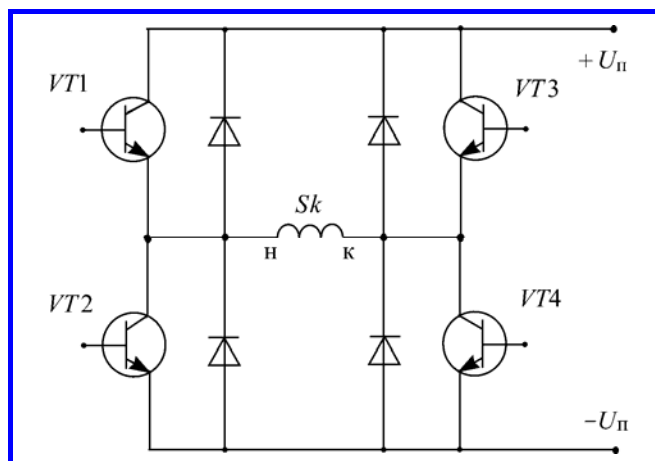


Рис. 1. Схема включения фазы при гальванически развязанных фазах обмотки якоря

на энергетические характеристики семифазного ВД.

С точки зрения повышения надёжности наиболее перспективным способом питания обмотки якоря является схема двигателя с гальванически развязанными фазами (рис. 1). В такой машине каждая фаза представляет собой независимый электрический контур, сохраняя при этом электромагнитные связи со всеми остальными электрическими контурами. При работе двигателя силовые ключи полупроводникового коммутатора VT_1 , VT_4 (и VT_2 , VT_3) работают одновременно. При открытии первой пары ключей начало фазы Sk подключается к положительной шине через ключ VT_1 , а конец этой фазы к отрицательной шине через ключ VT_4 . Для реверсирования тока первая пара ключей закрывается, и открывается вторая пара.

Пользуясь принятой в работе [12] терминологией считаем, что если в преобразовании энергии принимают участие все фазы обмотки якоря, то называем такой вариант полной коммутацией. В тех же случаях, когда в преобразовании энергии принимает участие только часть фаз обмотки якоря, коммутацию называем неполной. Рассмотрим влияние отказов на электромагнитную мощность и электромагнитный КПД семифазных ВД, в которых реализован алгоритм полной нейтральной коммутации с реверсивным питанием фаз обмотки якоря.

В работе [12] показано, что подавляющее большинство отказов элементов схемы ВД могут быть сведены к четырём основным видам отказов силовой части машины: обрыв и короткое замыкание силового ключа полупроводникового коммутатора (ОК и КК), обрыв и короткое замыкание фазы электромеханического преобразователя (ОФ и КФ). По характеру проявления отказов их можно разделить на два вида: отказы типа «обрыв» (это ОК и ОФ) и

отказы типа «короткое замыкание» (КК и КФ). Следует отметить, что при некоторых отказах структура ЭМП при работе может изменяться, а это существенно усложняет исследование электромагнитных процессов.

При гальванической развязке фаз по сравнению с замкнутой и разомкнутой схемами обмотки вероятность сохранения работоспособного состояния двигателя в случаях отказов увеличивается [12]. При отказе ключа коммутатора достаточно иметь только одну фазу, подключённую к одному из источников питания. В случае полной коммутации фаз обмотки при возникновении отказа «обрыв ключа» может сохраниться работоспособное состояние и в трёхфазном двигателе. Двигатель потребляет ток только от одного источника. При этом на половине тактов фаза коммутируется исправной парой ключей полупроводникового коммутатора (ПК), и фаза участвует в работе машины также, как и при работе в исправном состоянии. В случае неполной коммутации для получения возможности сохранения работоспособного состояния достаточно иметь одну фазу, подключённую к любому из источников. Это условие должно выполняться при обрыве фазы как при полной, так и при неполной коммутации.

Короткое замыкание пары ключей при полной коммутации приводит к постоянному подключению фазы обмотки к шинам одного из источников питания. В этом случае на половине тактов коммутации (когда согласно алгоритму коммутации должна работать отказавшая пара ключей) двигатель работает также, как и в исправном состоянии. На второй половине тактов коммутации напряжение источника питания суммируется с фазной ЭДС, ток фазы существенно возрастает и по своему характеру будет пульсирующим.

При коротком замыкании фазы обмотки обе пары ключей должны быть заперты, чтобы предотвратить короткое замыкание источника питания. Таким образом, неисправная фаза отключена от источника питания, по ней протекает переменный ток, величина и форма которого определяются фазной ЭДС.

Математические модели и методика расчёта энергетических параметров многофазных ВД (в исправном состоянии и при отказах элементов силовой части) по мгновенным значениям координат приведены в работе [12]. На основе этой методики разработаны пакеты программ расчёта энергетических характеристик многофазных ВД нормальных и аварийных режимов работы. Расчёт проводится в относительных единицах. Переход к системе относительных единиц упрощает запись уравнений, освобождая их от некоторых постоянных коэффициентов, облегчает вычисления, также

делает возможным сравнение результатов, получаемых для машин разной мощности. Относительные значения потребляемой мощности P_1 , электромагнитной мощности P_3 и электромагнитного КПД μ_3 исправного двигателя определяются на одном межкоммутационном интервале (МКИ) по выражениям

$$P_1 = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} F_1 d\theta_p; P_3 = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} F_2 d\theta_p; \mu_3 = \frac{P_3}{P_1},$$

где Δ – длительность МКИ; θ_p – угол поворота ротора в электрических радианах; функция F_1 – сумма мгновенных значений токов, потребляемых от всех источников питания; функция F_2 – сумма произведений относительных мгновенных значений фазных токов и ЭДС.

В качестве базовых величин напряжения, тока и мощности приняты: номинальное напряжение источника питания, фазный ток короткого замыкания и мощность, потребляемая одной фазой при коротком замыкании:

$$U_6 = U_n; I_6 = \frac{U_n}{r}; P_6 = \frac{U_n^2}{r},$$

где r – активное сопротивление фазы обмотки якоря.

Влияние индуктивности обмотки якоря на энергетические показатели учитываем с помощью коэффициента ξ , который по своей сути является относительным индуктивным сопротивлением эквивалентного контура при базовой частоте вращения. Поскольку частота вращения ротора двигателя изменяется от нуля до частоты идеального холостого хода, то введём относительное индуктивное сопротивление контура при текущей частоте вращения τ . Обе эти величины связаны между собой:

$$\tau = \frac{\omega_p L}{r} = \left(\frac{\omega_6 L}{r} \right) \left(\frac{\omega_p}{\omega_6} \right) = \xi V,$$

где L – индуктивность фазы обмотки якоря с учётом взаимной индуктивности от других фаз [13]; ω_6 – базовая частота вращения ротора (частота вращения, соответствующая режиму идеального холостого хода); ω_p – текущая частота вращения; V – относительная угловая частота вращения, которая определяется по выражению

$$V = \frac{E_m}{U_n},$$

где E_m – амплитуда ЭДС первой (основной) гармоники фазы.

Расчёт энергетических параметров при отказах элементов проводится путём интегрирования мгновенных значений координат на периоде повторяемости Δ_n электромагнитных процессов:

$$P_1 = \frac{1}{\Delta_n} \left[\sum_{T=T_n}^{T_k} \left(\int_0^{\theta_0} F_1 d\theta_p + \int_{\theta_0}^{\Delta} F_1' d\theta_p \right) \right];$$

$$P_3 = \frac{1}{\Delta_n} \left[\sum_{T=T_n}^{T_k} \left(\int_0^{\theta_0} F_2 d\theta_p + \int_{\theta_0}^{\Delta} F_2' d\theta_p \right) \right],$$

где T_n , T_k и T – соответственно начальный, конечный и текущий такты периода повторяемости электромагнитных процессов; θ_0 – угол поворота ротора, при котором происходит изменение структуры ЭМП, обусловленное отказом элементов силовой части ВД (определяет границы участков МКИ). На каждом из тактов периода повторяемости электромагнитных процессов рассчитываем составляющие потребляемой и электромагнитной мощности по каждому из участков МКИ. Функции $F_1(F_1')$ – это суммы мгновенных значений токов, потребляемых от всех источников питания на первом (втором) участках МКИ. Функции $F_2(F_2')$ представляют собой суммы произведений относительных мгновенных значений фазных токов и ЭДС, которые работают на первом (втором) участках МКИ.

В аварийных режимах работы в первую очередь определяются мгновенные значения координат исправного ВД на первом МКИ при заданной относительной частоте вращения. Далее на алгоритм коммутации исправной машины накладывается метка соответствующего отказа элемента силовой части, и определяются границы периода повторяемости электромагнитных процессов (начальный T_n и конечный T_k такты коммутации). При этом последовательно вычисляются мгновенные значения фазных координат на каждом участке МКИ и каждом МКИ в соответствии с изменением структуры ЭМП, которое вызывается отказом. После этого по мгновенным значениям фазных координат рассчитываются энергетические параметры ВД (P_1 , P_3 , μ_3) на периоде повторяемости электромагнитных процессов путём применения одного из методов численного интегрирования.

Электромагнитный КПД μ_3 при отказах элементов и для исправной машины определяется одинаково.

Задавая несколько значений относительной частоты вращения и рассчитывая энергетические параметры, получаем энергетические характеристики для интересующих нас режимов работы ВД:

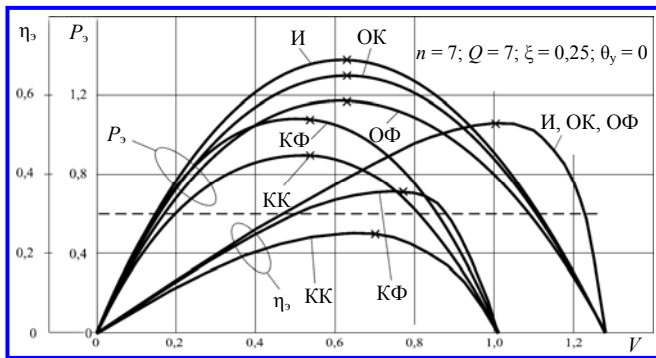


Рис. 2. Энергетические характеристики ВД в исправном состоянии и при отказах элементов силовой части

$$\begin{aligned} \mu_3 &= f(V) \text{ при } \xi = \text{const}; \theta_y = \text{const}; \\ P_3 &= f(V) \text{ при } \xi = \text{const}; \theta_y = \text{const}. \end{aligned}$$

Рассмотрим энергетические характеристики (рис. 2) семифазных ВД с величиной относительного индуктивного сопротивления фазы $\xi = 0,25$ при полной нейтральной коммутации (угол управления коммутацией $\theta_y = 0$) в исправном состоянии и при указанных выше отказах элементов силовой части двигателей.

Относительная частота вращения идеального холостого хода V_0 определяет верхнюю границу диапазона частот, при котором машина работает в двигательном режиме. В случаях нейтральной коммутации при отказах типа «обрыв» верхняя граница рабочего диапазона не изменяется ($V_0 = 1,27$). Объясняется это особенностями реакции якоря в ВД. Действие потока реакции якоря зависит не только от положения зоны коммутации, тока якоря, но и от положения ротора. При нейтральной коммутации МДС реакции якоря имеет поперечную и продольную составляющие. Величина и характер последней зависят от положения ротора в пределах МКИ. Так в начале МКИ она является размагничивающей, а в конце – намагничивающей. Поскольку величины продольных составляющих в начале и конце интервала равны, то среднее значение магнитного потока не изменяется. В середине интервала МДС якоря и основных полюсов сдвинуты на угол $\pi/2$, а реакция якоря имеет только поперечную составляющую, которая при ненасыщенной магнитной цепи величины потока не изменяет.

Отказы типа «короткое замыкание» приводят к уменьшению верхней границы рабочего диапазона частоты вращения на 14%. В большинстве электроприводов уменьшение рабочего диапазона частот не желательно. И по этой причине следует избегать появления отказов типа «короткое замыкание».

Для всех рассматриваемых видов отказов (см. рис. 2) величина максимальной электромагнитной мощности P_3^{\max} уменьшается по сравнению с максимальной электромагнитной мощностью исправной машины. По степени роста влияния на величину P_3^{\max} отказы располагаются в такой последовательности: «обрыв ключа ПК»; «обрыв фазы ЭМП»; «короткое замыкание фазы ЭМП» и «короткое замыкание ключа ПК». Величины максимальной электромагнитной мощности для указанной последовательности отказов составляют, соответственно, 93, 86, 80 и 74 % от той же мощности, развиваемой исправной машиной.

Самым неблагоприятным видом отказа является короткое замыкание одной пары силовых ключей ПК на шины источника питания. Ток в фазе, коммутируемой отказавшей парой ключей, будет пульсирующим, а его величина зависит от величины фазной ЭДС, которая определяется частотой вращения индуктора. В этом случае вопрос о способе исключения отказа решается совместно с вопросами защиты силовых ключей ПК от сквозных токов и ограничения пусковых токов. В результате принимается решение о способе исключения отказавшего ключа из работы двигателя. При разработке схемы двигателя обычно предусматривается последовательное соединение каждого ключа с защитным отключающим элементом, разрывающим электрическую цепь отказавшего ключа. Такое решение позволяет отказ «короткое замыкание ключа ПК» свести к отказу «обрыв ключа ПК», влияние которого на энергетические параметры ВД в 3,7 раза меньше.

Следующим по степени влияния видом отказа является «короткое замыкание фазы ЭМП». Способ исключения отказа в данном случае решается путём применения специальных конструктивных вариантов исполнения обмотки, повышения качества изоляционных материалов и более совершенной технологии производства. Суть специальных конструктивных вариантов заключается в возможности обеспечения разрыва цепи короткозамкнутой фазы в случае возникновения отказа. Таким образом, отказ «короткое замыкание фазы ЭМП» может быть сведён к отказу «обрыв фазы ЭМП», который обладает меньшим влиянием на энергетические параметры ВД.

Отказы «обрыв фазы ЭМП» и «обрыв ключа ПК» меньше влияют на снижение электромагнитной мощности. В первом случае при работе двигателя фаза не участвует в преобразовании энергии, во втором – фаза подключается исправной парой ключей к источнику питания на половине тактов периода повторяемости электромагнитных процес-

сов, точно также как и при работе исправного двигателя. По этой причине первый из отказов в большей мере снижает величину электромагнитной мощности (на 14%), чем второй отказ (на 7%). Поскольку при этих видах отказов дополнительных потерь, которые приводили бы к уменьшению КПД, не возникает, то электромагнитный КПД будет практически таким же, как и в исправной машине (см. рис. 2).

В случаях отказов «короткое замыкание ключа ПК» и «короткое замыкание фазы ЭМП» по сравнению с исправным состоянием и предыдущими отказами (см. рис. 2) величина максимального электромагнитного КПД двигателей уменьшается, соответственно, в 2,1 и 1,5 раза. С одной стороны, это вызвано уменьшением МДС якоря, создающей активный вращающий момент. С другой стороны, переменный или пульсирующий ток отказавшей фазы создаёт свое пульсирующее магнитное поле, которое также взаимодействует с магнитным полем индуктора, в результате чего появляется тормозной момент. При коротком замыкании фазы величина пульсирующего поля определяется в основном величиной фазной ЭДС, которая в свою очередь пропорциональна частоте вращения. Кроме этого, ток отказавшей фазы оказывается сдвинутым по фазе относительно тока исправной машины на π электрических радиан. При коротком замыкании пары ключей ПК на одной половине тактов периода повторяемости электромагнитных процессов (соответствующих включённому состоянию неисправных ключей) фазный ток протекает точно также, как и при работе исправной машины. На второй половине тактов напряжение источника питания суммируется с фазной ЭДС, в результате чего результирующее напряжение будет гораздо больше, чем при работе исправной машины или машины с коротким замыканием фазы. Кроме существенного роста величины фазного тока, на этих тактах изменяется и фазовый сдвиг по отношению к фазовому сдвигу тока исправной машины. В итоге (см. рис. 2) величина максимального электромагнитного КПД двигателя при коротком замыкании ключа ПК (0,25) оказывается меньше, чем величина максимального электромагнитного КПД (0,36) при коротком замыкании фазы. Вместе с изменением величины электромагнитного КПД изменяется положение экстремальной точки на характеристике КПД. Если в исправном состоянии и при отказах «обрыв ключа ПК», «обрыв фазы ЭМП» электромагнитный КПД имеет максимум при относительной частоте вращения $V = 1,03$, то при отказе короткое замыкание фазы электромеханического

преобразователя – 0,77, а при отказе «короткое замыкание ключа ПК» еще меньше – 0,70. В результате этого изменяется соотношение между восходящей и нисходящей частями характеристик КПД.

Наличие количественной оценки влияния отказов на электромагнитную мощность позволяет уже на этапе проектирования электропривода оценить возможность работы его исполнительного элемента и в случаях отказов силовой части предусмотреть, в частности, меры, предупреждающие возможность появления отказов, оказывающих наибольшее снижение электромагнитной мощности. Исключение возможности отказов типа «короткое замыкание» путём сведения их к отказам типа «обрыв» является одним из вариантов сохранения работоспособного состояния многофазных ВД. Например исключив возможность отказов типа «короткое замыкание» в нашем двигателе, получаем, что снижение максимальной электромагнитной мощности при отказах типа «обрыв» не будет превышать 14%.

Полученные количественные соотношения позволяют на этапе проектирования оценить работоспособность ВД при возникновении отказов элементов силовой части двигателя. В зависимости от режимов работы критериями оценки работоспособного состояния ВД могут служить минимальная величина электромагнитной мощности при заданной частоте вращения или минимальная величина электромагнитного КПД. Например при заданной номинальной частоте вращения $V_n = 1,0$ и минимальной величине электромагнитной мощности 0,60 (см. рис. 2) получим, что работоспособное состояние двигателя сохранится как при отказах типа «обрыв», так и при отказе «короткое замыкание фазы ЭМП». В случае отказа «короткое замыкание ключа ПК» двигатель имеет меньшую величину электромагнитной мощности (0,25 при КК). При длительном режиме работы двигателей в качестве критерия оценки работоспособности чаще всего используется минимальная величина электромагнитного КПД. Если её задать равной 0,50, то окажется, что машина обеспечивает поставленные требования при отказах типа «обрыв» при частотах вращения от 0,46 до 1,22, и при отказе «короткое замыкание фазы ЭМП» – при частотах вращения от 0,48 до 0,88. В случае отказа «короткое замыкание ключа ПК» машина не обеспечивает заданный уровень КПД и считается неисправной.

Таким образом, количественная оценка энергетических характеристик семифазных ВД нормальных и аварийных режимов работы позволяет получить полную информацию об исполнительном элементе электропривода и провести его обоснованный выбор.

Выводы

1. Получены энергетические характеристики семи-фазных ВД малой мощности с гальванически развязанными фазами обмотки якоря при отказах элементов полупроводникового коммутатора и электромеханического преобразователя.

2. Проведена оценка влияния отказов элементов силовой части ВД четырёх видов на величину электромагнитного КПД и электромагнитной мощности при постоянной индуктивности обмотки для полной нейтральной коммутации. Установлена степень влияния этих отказов на энергетические характеристики двигателей.

3. Предложены критерии оценки работоспособного состояния ВД при возникновении отказов типа «обрыв» и «короткое замыкание».

Литература

1. Балагуров В. А. Бесконтактные двигатели постоянного тока / В. А. Балагуров, В. М. Гридин, В. К. Лозенко. – М. : Энергия, 1975. – 128 с.
2. Дубенский А. А. Бесконтактные двигатели постоянного тока / А. А. Дубенский. – М. : Энергия, 1967. – 144 с.
3. Овчинников И. Е. Бесконтактные двигатели постоянного тока / И. Е. Овчинников, Н. И. Лебедев. – Л. : Наука, 1979. – 270 с.
4. Элементы конструкции бесконтактных микродвигателей постоянного тока с датчиками ЭДС Холла / Е. М. Михайлов // Электрические машины автоматических устройств: сб. науч. трудов ВНИИЭМ. – М. : ВНИИЭМ, 1969. – Т. 30. – С. 271 – 278.

5. Перспективы развития автоматизированного электропривода металлорежущих станков / О. П. Михайлов // Электричество. – 1985. – № 10. – С. 11 – 17.

6. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Н. П. Адволоткин, В. Т. Гращенков, Н. И. Лебедев [и др.]. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

7. Самолёты с полностью электрифицированным оборудованием / Д. Э. Брускин, С. И. Зубакин // Итоги науки и техники. Электрооборудование транспорта. – М. : ВИНТИ. 1986. – № 6. – С. 1 – 112.

8. Надёжность и эффективность в технике. Методология. Организация. Терминология: справочник / под ред. А. И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 224 с.

9. Справочник по расчёту надёжности машин на стадии проектирования / Б. Ф. Хазов, Б. А. Дидусев – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.

10. Лозенко В. К. Вентильные двигатели для авиационных механизмов: автореферат диссертации ... доктора технических наук. – М. : Изд-во МЭИ, 1985. – 35 с.

11. Сандалов В. М. Резервированные электроприводы на базе вентильных двигателей: автореферат диссертации ... кандидата технических наук. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 18 с.

12. Вигриянов П. Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: монография / П. Г. Вигриянов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 143 с.

13. Исследование пульсаций момента тихоходных бесконтактных двигателей постоянного тока с дискретным датчиком положения ротора / С. Г. Воронин, В. А. Лифанов, Б. Г. Шумихин // Электричество. – 1977. – № 11. – С. 54 – 58.

Поступила в редакцию 19.06.2012

Павел Георгиевич Вигриянов, канд. техн. наук, доцент,
т. (351) 366-58-69 (доб. *2111), e-mail: eapp@kaf_zb-susu.ru.