

# ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.313.292.001.2

Вигриянов П.Г.

## ПУЛЬСАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА УПРАВЛЯЕМЫХ ДЕВЯТИФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ОТКАЗАХ ТИПА «ОБРЫВ»

В статье изложены результаты расчета пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента управляемого девятифазного вентильного двигателя с гальванически развязанными фазами обмотки якоря для заданного диапазона частот вращения при изменении угла управления коммутацией в пределах одного межкоммутационного интервала для отказов «обрыв силового ключа полупроводникового коммутатора» и «обрыв фазы электромеханического преобразователя».

**Ключевые слова:** девятифазный вентильный двигатель, электромагнитный момент, пульсации момента, отказ элемент, обрыв ключа полупроводникового коммутатора; обрыв фазы электромеханического преобразователя.

The article presents the result of calculation of the current ripple component of the electromagnetic torque controlled nine-phase valve engine with galvanically separated phases of the armature winding for a given speed range when the angle switching control in a single interval for failure intercommutating «break the power semiconductor switch key» and «termination phase electromechanical transducer».

**Keywords:** nine-phase valve engine, the electromagnetic torque, pulse time, the refusal element, break key semiconductor switch, phase loss of the electromechanical transducer.

Вентильные электроприводы малой мощности применяются во многих отраслях промышленности и техники: в системах управления полетом, космических и промышленных роботах, манипуляторах, металлорежущих станках, медицине, устройствах звукозаписи и видеозаписи [1–5].

В настоящее время к этим приводам часто предъявляются повышенные требования по уровню пульсаций электромагнитного момента и показателям надежности, которые могут быть удовлетворены путем разработки новых конструктивных решений электрических двигателей. Наиболее перспективными исполнительными элементами электропривода являются вентильные двигатели (ВД) постоянного тока за счет их высокой надежности и широких возможностей для резервирования [6–9]. Увеличение числа фаз электромеханического преобразователя (ЭМП) такого двигателя обеспечивает не только структурную избыточность, но и дает возможность управления коммутационными процессами, то есть создает 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 путем изменения величины питающего напряжения, алгоритмов коммутации фаз обмотки или угла управления коммутацией.

В работе [10] показано, что подавляющее большинство отказов элементов схемы ВД могут быть сведены к четырем 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). По статистическим данным [11] для машин си-

стем автоматики в 70% случаев отказов наблюдается обрыв обмотки в 30% – замыкание, если в процессе эксплуатации нагрузки не превышали допустимых уровней.

**Постановка задачи.** Требуется оценить величину пульсаций электромагнитного момента управляемых девятифазных ВД при отказах элементов силовой части типа «обрыв».

С точки зрения повышения надежности 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 (ПК) VT1, VT4 (и VT2, VT3) работают одновременно. При открывании первой пары ключей начало фазы  $S_k$  подключается к положительной шине через ключ VT1, а конец этой фазы – к отрицательной шине через ключ VT4. Для реверсирования тока первая пара ключей закрывается и открывается вторая пара.

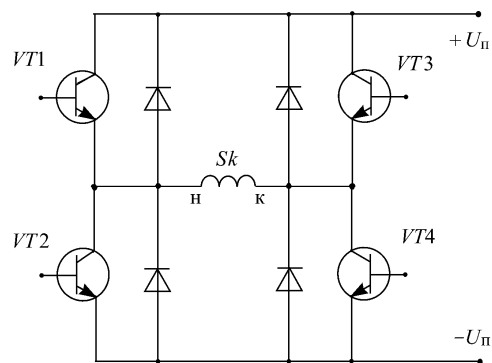


Рис. 1. Схема включения фазы при гальванически развязанных фазах обмотки якоря

Отказ «обрыв ключа ПК» возникает в том случае, если в процессе работы происходит обрыв одного из любой пары ключей. При этом на одной половине тактов фаза отключена от источника питания, а на второй половине тактов коммутируется исправной парой ключей и фаза участвует в работе машины так же, как и при работе в исправном состоянии (зависимость ОК на рис. 2). Отказ «обрыв фазы ЭМП» приводит к тому, что фаза не участвует в преобразовании энергии на всех тактах периода повторяемости электромагнитных процессов (зависимость ОФ на рис. 2).

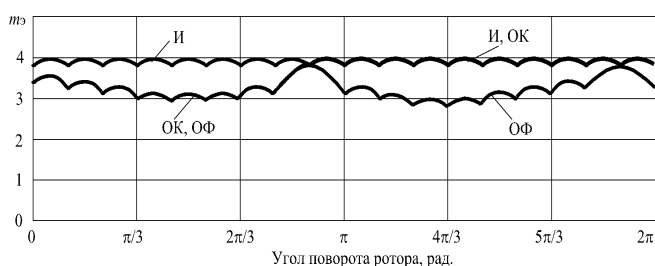


Рис. 2. Пульсации токовой составляющей электромагнитного момента ВД в исправном состоянии (И) и отказах элементов силовой части «обрыв ключа ПК» (ОК), «обрыв фазы ЭМП» (ОФ) (при  $\xi=0,25; V=0,4; \theta_y=0$ )

Для выяснения влияния отказов «обрыв ключа ПК» и «обрыв фазы ЭМП» на величину пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента нашего двигателя воспользуемся программным обеспечением, разработанным на основе общей методики расчета мгновенных значений координат для многофазных ВД двигателей в нормальных и аварийных режимах работы [10]. Расчет проводится в относительных единицах.

Расчет пульсаций момента проводится в такой последовательности. Сначала рассчитываем мгновенные значения фазных координат и электромагнитного момента двигателя в исправном состоянии при заданной относительной частоте вращения и угле управления коммутацией, затем вводим метку отказа и определяем период повторяемости электромагнитных процессов (его первый и последний такты). После этого проводим расчет мгновенных значений электромагнитного момента на периоде повторяемости электромагнитных процессов, последовательно переходя от начального такта коммутации до конечного такта. В результате получаем зависимости мгновенного значения токовой составляющей электромагнитного от угла поворота ротора для каждого вида отказа. Пример таких зависимостей приведен на рис. 2. После этого определяем минимальное  $m_{\min}$ , максимальное  $m_{\max}$  значения момента и проводим численное интегрирование для определения среднего значения момента на периоде повторяемости  $m_{\text{ср}}$ .

Величину пульсаций электромагнитного момента будем оценивать по отношению разности максимального и минимального моментов к среднему моменту, выраженному в процентах

$$\Delta m, \% = (m_{\max} - m_{\min}) / m_{\text{ср}} \cdot 100\%.$$

Рассмотрим пульсации момента деятифазных управляемых ВД для отказов типа «обрыв» элементов силовой части при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного МКИ при одинаковой величине индуктивности фаз обмотки якоря. Индуктивность обмотки удобно учитывать при помощи коэффициента  $\xi$ , который по своей сути является относительным индуктивным сопротивлением фазы обмотки якоря при базовой частоте вращения. Относительная угловая частота вращения определяется по выражению

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

где  $E_m$  — амплитуда ЭДС основной гармоники фазы;  $U_n$  — номинальное напряжение питания двигателя.

На рис. 3 приведены зависимости относительных пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента  $\Delta m, \%$  в случаях отказов типа «обрыв» при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного МКИ  $\theta_y = \pm 10^\circ$  ( $\pm \pi/18$ ) для диапазона частот вращения  $V=0,05-0,85$  при относительной индуктивности обмотки якоря  $\xi=0,25$ .

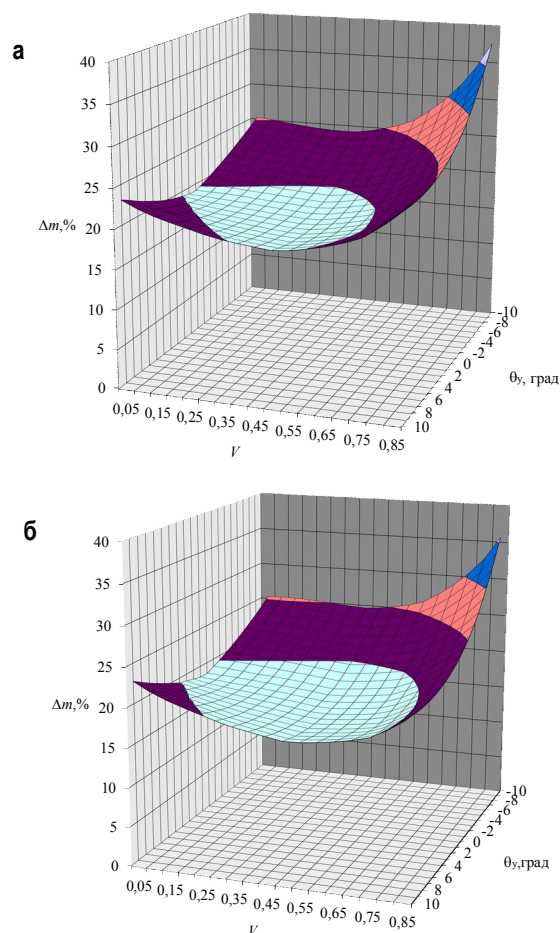


Рис. 3. Пульсации электромагнитного момента деятифазного ВД при отказах «обрыв ключа ПК» (а) и «обрыв фазы ЭМП» (б) при  $\xi=0,25; V=0,05-0,85; \theta_y = \pm 10^\circ$

Сначала проведем оценку относительной величины пульсаций момента ( $\Delta m, \%$ ) при нейтральной коммутации ( $\theta_y=0$ ). В случае отказа «обрыв ключа ПК» (рис. 3, а) величина пульсаций момента сначала уменьшается с 19,75% (при  $V=0,05$ ) до 18,8% (при  $V=0,45$ ), затем увеличивается до 26,6% (при  $V=0,85$ ). Регулирование угла управления в сторону отстающей коммутации при любой частоте вращения ведет к росту уровня пульсаций. При регулировании угла управления в сторону опережения величина пульсаций сначала снижается до минимального значения, а затем увеличивается. Так, при  $V=0,05$  минимальный уровень пульсаций имеем при  $\theta_y=+1^\circ$ , самый меньший уровень пульсаций – 18,47% (при  $V=0,45$ ;  $\theta_y=3^\circ$ ), а при  $V=0,85$  пульсации составляют 24,52% при угле управления  $+6^\circ$ .

Характер изменения величины пульсаций для предельных значений угла управления  $\theta_y=\pm 10^\circ$  одинаков, однако имеются количественные различия: при отстающей коммутации  $\theta_y=-10^\circ$  величина пульсаций сначала снижается с 25,27% на 0,64%, а затем возрастает на 11% относительно минимального значения. При опережающей коммутации  $\theta_y=+10^\circ$  уровень пульсаций сначала снижается на 5,5% ( $V=0,5$ ), а затем возрастает на 3,9% ( $V=0,85$ ). В результате величина пульсаций при  $V=0,85$  оказывается меньше, чем при  $V=0,05$ . С ростом относительной частоты вращения минимальный уровень пульсации момента смещается в сторону большей величины угла управления ( $\theta_y=+1^\circ$  при  $V=0,05$  и  $\theta_y=+6^\circ$  при  $V=0,85$ ).

Таким образом, изменение угла управления коммутацией в пределах одного МКИ для выбранного диапазона частот вращения позволяет получить в уровень пульсаций электромагнитного момента ВД при отказах «обрыв ключа ПК» в пределах 18,47–37,45%.

При отказах «обрыв фазы ЭМП» (рис. 3, б) наблюдаются аналогичные закономерности, но имеются количественные различия. Так, при нейтральной коммутации уровень пульсаций момента снижается с 19,2% (при  $V=0,05$ ) до 17,78 (при  $V=0,45$ ), а затем возрастает до 23,14% (при  $V=0,85$ ). Характер изменения величины пульсаций момента сохраняется при регулировании угла управления коммутацией в сторону опережения и отставания сохраняется, только величины пульсаций момента при обрыве фазы будут меньше, чем при обрыве ключа (на 0,01–0,3% при  $V=0,05$  и 2–3% при  $V=0,85$ ). Минимальная величина пульсаций момента при таком отказе составляет 17,04% при  $V=0,5$  и  $\theta_y=+5^\circ$ . Перемещение минимального значения уровня пульсаций момента в область опережающей коммутации объясняется длительностью протекания коммутационных процессов. При малых частотах вращения это влияние на мгновенные значения координат меньше, поскольку коммутационные процессы занимают меньшую часть МКИ и угол управления  $\theta_y = +1^\circ$  мал. При высоких частотах вращения эти процессы занимают все большую часть МКИ, и для получения минимальной величины пульсаций момента следует увеличивать угол управления коммутацией до  $\theta_y=+6^\circ$  при  $V=0,85$ .

Таким образом, при изменении угла управления коммутацией в пределах одного МКИ для выбранного

диапазона частот вращения получим уровень пульсаций электромагнитного момента ВД при отказах «обрыв фазы ЭМП» в пределах 17–35,6%.

Для сравнения величины пульсаций при отказах элементов с величиной пульсаций исправной машины следует добавить, что при нейтральной коммутации величина пульсаций увеличивается с 1,6% (при  $V=0,05$ ) до 2,0% (при  $V=0,85$ ). А для предельных углов управления с ростом частоты вращения величина пульсаций уменьшается с 6,2% (при  $V=0,05$ ) до 5,4% (при  $V=0,85$ ) при отстающей коммутации и с 4,3 до 3,6% при опережающей коммутации.

Полученные результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что при отказах «обрыв фазы ЭМП» величина пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента меньше, чем при отказах «обрыв ключа ПК».

Поскольку величина пульсаций момента часто является критерием оценки работоспособного состояния управляемого ВД, то полученные результаты могут быть использованы в качестве такового при разработке вентильных электроприводов повышенной надежности.

### Выводы

1. Получены зависимости величины пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента девятифазных управляемых ВД малой мощности с гальванически развязанными фазами обмотки якоря для выбранного диапазона частот вращения при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного межкоммутационного интервала.

2. Проведена оценка влияния отказов типа «обрыв» на величину пульсаций электромагнитного момента при постоянной индуктивности обмотки якоря. Установлена степень влияния этих отказов на величину пульсаций управляемых девятифазных ВД.

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

### Список литературы

1. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока. М.: Энергия, 1975. 128 с.
2. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979. 270 с.
3. Михайлов О.П. Перспективы развития автоматизированного электропривода металлорежущих станков // Электричество. 1985. № 10. С. 11-17.
4. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Адволоткин Н.П., Гращенков В.Т., Лебедев Н.И., Овчинников И.Е., Стыцына А.К. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
5. Брусин Д.Э., Зубакин С.И. Самолеты с полностью электрифицированным оборудованием // Итоги науки и техники. Электрооборудование транспорта. М.: ВИНТИ, 1986. №6. С. 1-112.
6. Надежность и эффективность в технике. Методология. Организация. Терминология: справочник / под ред. А.И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1986. Т.1. 224 с.
7. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
8. Лозенко В.К. Вентильные двигатели для авиационных механизмов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Изд-во МЭИ, 1985. 35 с.
9. Сандалов В.М. Резервированные электроприводы на базе вентильных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. 18 с.
10. Вигринов П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 143 с.
11. Белецкий В.В. Теория и практические методы резервирования радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1977. 104 с.

## Bibliography

1. Balagurov V.A., Gridin V.M., Lozenko V.K. Contactless DC motors. Moscow: Energiya, 1975. 128 p.
2. Ovchinnikov I.T., Lebedev N.I. Contactless DC motors. Leningrad: Nauka, 1979. 270 p.
3. Mikhailov O.P. Prospects for the development of automated electron troprivoda Machine Tools // Electricity. In 1985. Number 10. P. 11-17.
4. Advolotkin N.P., Grashchenkov V.T., Lebedev N.I., Ovchinnikov I.E., Stytsyna A.K. Managed contactless DC motors. L.: Energoatomizdat, 1984. 160 p.
5. Bruskin D.E., Zubakin S.I. Aircraft with a fully-dated equipment elektrifitsi // Results of science and technology. Tion for electrical transport. VINITI. In 1986. №6. P. 1-112.
6. The reliability and efficiency of the technique. Methodology. Organization. Terminology: A Handbook, ed. A. Rembeza. Moscow Machine-Building, 1986. V.1. 224 p.
7. Khazov B.F., Didusev B.A. Guide to the calculation of the reliability of machines at the design stage. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 224 p.
8. Lozenko V.K. Rotary engines for aircraft mechanisms: summary of the thesis. Dr. ... technical. Sciences. M. Univ Dept, 1985. 35 p.
9. Sandalov V.M. Redundant electric motors based on the gate: summary of the thesis. ... Candidate. Technical. Sciences. Chelyabinsk: Publishing House of the South Ural State University, 2000. 18 p.
10. Vigrayanov P.G. The electromagnetic processes of multiphase valve engines: a monograph. Chelyabinsk: Publishing House of the South Ural State University, 2007. 143 p.
11. Beletsky V.V. The theory and practical methods of backup electronic equipment. Moscow: Energiya, 1977. 104 p.

УДК 338.45

Големенцев Б.В., Слепов В.М., Казимиров А.А.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ОПЫТНО-СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Предложена вероятностно-статистическая модель расчета оптимального количества режущего инструмента, учитывающая специфику опытно-серийного производства. Также показан алгоритм работы складской автоматизированной системы, в основе которой заложена описанная модель.

**Ключевые слова:** опытно-серийное производство, удельная норма расхода, суммарный предыдущий период, плановый период, плановый запас инструмента, дневная потребность в инструменте, минимальный запас, точка запаса, условие обеспеченности.

We propose a probabilistic-statistical model for calculating the optimal number of cutting tools with a specific of pilot-scale production. It also shows the algorithm of the automated warehouse, which lies at the basis of the described model.

**Keywords:** pilot-scale production, specific consumption rate, total previous period, planning period, planned supply of tools, daily demand for the product, minimum stock, stock point, condition of security.

Главной задачей любого производственного предприятия, в том числе и опытно-серийного, является выполнение контрактных обязательств при определенных ограничениях по затратам. План выпуска продукции предприятия, составленный на основе этих обязательств, не подлежит коррекции никем, кроме руководителя предприятия [1]. Основными компонентами такого плана является номенклатура изделий, количество и сроки изготовления. Отметим, что в опытно-серийном производстве номенклатура изделий разнообразна и разбивается на группы деталей, входящих в состав изделий, наиболее схожих по конструкции, технологии и трудоемкости изготовления. Исходя из таких положений, производственная программа, основанная на плане выпуска продукции, является приведенной. Оставим вне нашего внимания принципы формирования такой программы и перейдем к описанию общих вопросов подготовки производства и проблемам, возникающим в процессе подготовки режущего инструмента.

Сроки на подготовку производства и сроки изготовления деталей и сборочных единиц, входящих в состав изделий, формируются на основе компонентов плана. При подготовке и планировании производства учитываются следующие моменты:

- наличие/отсутствие заготовок (прокат, отливки, поковки и т.д.), сроки поставки заготовок в механические цеха, а также загрузка оборудования в цехе заготовительного производства;
- наличие/отсутствие технологической оснастки и вспомогательного инструмента, сроки их изготовления;

- готовность сопроводительной документации (технологические процессы) и управляющих программ для механической обработки на станках с ЧПУ;
- загрузка оборудования в механических цехах;
- наличие/отсутствие режущего<sup>1</sup> и мерительного инструмента, а также сроки его изготовления или приобретения со стороны.

В опытно-серийном производстве нередко возникает ситуация, связанная с необеспеченностью и переизбытком того или иного инструмента.

Причины необеспеченности разные: высокий спрос на производимую серийную продукцию в сочетании с опытно-конструкторскими разработками; несвоевременное пополнение складских запасов, ошибки рабочего; сложность и трудоемкость обработки, если коснуться обработки корпусных деталей, а также деталей из труднообрабатываемых материалов. Дефицит того или иного инструмента может привести к частичному или полному срыву производственной программы, если по причине такого дефицита откладывается выпуск изделий и передача их в другие цеха для последующей обработки.

С другой стороны, замена дефицитного инструмента на аналог является не всегда оптимальным выходом из ситуации. Во-первых, расширяется применимость инструмента, следовательно, увеличивается вероятность дефицита такого аналога в будущем. Во-

<sup>1</sup> Под словом «инструмент» мы будем подразумевать инструмент режущий.