

УДК 62-83:621.313.84

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ
ФАЗНЫХ ТОКОВ В ВЕНТИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ДИСКРЕТНЫМ
ДАТЧИКОМ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА****Соловьев Владимир Алексеевич,**д.т.н., профессор кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, e-mail:
solovjevva@bk.ru**Соловьева Виктория Владимировна,**

к.т.н., доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, e-mail: soloveyev@mail.ru

Соболев Владимир Афанасьевич,к.т.н., доцент кафедры ФН-7 МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, e-mail:
vasobolev48@yandex.ru**Аннотация**

Определена оптимальная относительная длительность прямоугольных фазных токов вентильного двигателя с дискретным датчиком положения ротора, обеспечивающая максимум его электромагнитной мощности при одинаковых действующих значениях синусоидального и прямоугольного фазного тока. При условии равенства мощностей потерь в меди фазных обмоток вентильного двигателя получено соотношение между амплитудами синусоидального и прямоугольных фазных токов с заданной относительной длительностью.

Ключевые слова: вентильный двигатель, дискретный датчик положения ротора, мощность потерь в меди обмоток, синусоидальный и прямоугольный фазный ток, оптимальная относительная длительность включения секции фазной обмотки

**DETERMINING THE OPTIMAL DURATION OF RECTANGULAR PHASE
CURRENTS IN A BRUSHLESS DC MOTOR WITH A DISCRETE ROTOR
POSITION SENSOR****Soloviev Vladimir Alekseevich,**D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of FN-7, Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, e-mail: solovjevva@bk.ru**Solovieva Victoria Vladimirovna,**Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of FN-7, Bauman Moscow State Technical
University, Moscow, e-mail: soloveyev@mail.ru**Sobolev Vladimir Afanasyevich,**

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of FN-7, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: vasobolev48@yandex.ru

ABSTRACT

The optimal relative duration of rectangular phase currents of a brushless DC motor with a discrete rotor position sensor is determined, ensuring the maximum of its electromagnetic power with the same effective values of sinusoidal and rectangular phase current. Under the condition of equality of the power losses in copper of the phase windings of a brushless DC motor, a relationship is obtained between the amplitudes of sinusoidal and rectangular phase currents with a given relative duration.

Keywords: brushless DC motor, discrete rotor position sensor, power loss in copper windings, sinusoidal and rectangular phase current, optimal relative duration of phase winding section switching on.

Форма фазных ЭДС и токов вентильных двигателей (ВД) существенно влияет на их основные характеристики. Известно, что при постоянстве потерь мощности в меди максимальная мощность ВД достигается при совпадении форм фазного тока и фазной ЭДС вращения. При этом обеспечивается максимальный КПД и коэффициент использования электрической машины ВД [1]. В связи с этим в ВД с синусоидальной ЭДС стараются формировать фазные токи синусоидальной формы.

В зависимости от области применения ВД, допустимых пульсаций электромагнитного момента и других технических требований в его фазных обмотках могут формироваться токи прямоугольной формы [2].

Прямоугольные фазные токи обычно формируются в ВД с дискретными датчиками положения ротора (ДПР), которые по сравнению с ВД, содержащими аналоговые ДПР, меньше подвержены воздействию электромагнитных помех и поэтому обладают большей надёжностью функционирования при удалении блока управления и коммутатора от электромеханической части ВД.

Несовпадение форм фазных ЭДС вращения и токов снижает эффективность электромеханического преобразования энергии в ВД, которое будет проявляться в снижении развиваемой электродвигателем электромагнитной мощности. Её значение зависит от относительной длительности прямоугольных фазных токов.

Целью проводимого исследования является определение математической зависимости развиваемой ВД электромагнитной мощности от относительной длительности проходящих по его фазным обмоткам токов прямоугольной формы и оценка степени уменьшения ее по сравнению с ее значением при синусоидальных фазных токах.

С учётом подобию проходящих в фазных обмотках ВД процессов это можно выполнить только для одной секции фазной обмотки. Поставленную задачу будем решать при условии равенства мощностей потерь в меди при синусоидальных и прямоугольных фазных токах. Для их расчёта воспользуемся выражением

$$\Delta P_{\text{м.с}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} R_c i_c^2(\alpha) d\alpha, \quad (1)$$

а развиваемую ВД электромагнитную мощность при работе одной секции фазной обмотки будем определять по формуле

$$P_{\text{эм.с}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e_c(\alpha) i_c(\alpha) d\alpha, \quad (2)$$

где α – угол поворота ротора ВД (в электрических радианах), отсчитываемый от момента естественной коммутации секции фазной обмотки; R_c – активное сопротивление секции фазной обмотки ВД; $i_c(\alpha)$ – зависимость тока включенной секции фазной обмотки от угла поворота ротора; $e_c(\alpha)$ – зависимость ЭДС вращения включенной секции фазной обмотки от угла поворота ротора.

Подставляя в (2) $e_c(\alpha) = U_{\text{п}} v \sin \alpha$, при синусоидальном фазном токе $i_c(\alpha) = I_{\text{с.мах}} \sin \alpha$ получим

$$\Delta P_{\text{м.с.син}} = \frac{1}{2} R_c I_{\text{с.мах}}^2, \quad (3)$$

$$P_{\text{эм.с.син}} = \frac{1}{2} U_{\text{п}} v I_{\text{с.мах}}, \quad (4)$$

а при прямоугольном фазном токе

$$\Delta P_{\text{м.с.пр}} = \frac{1}{\pi} R_c I_{\text{с.пр}}^2 \alpha_{\text{вкл}}, \quad (5)$$

$$P_{\text{эм.с.пр}} = \frac{2}{\pi} U_{\text{п}} v I_{\text{с.пр}} \sin \frac{\alpha_{\text{вкл}}}{2}, \quad (6)$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение источника питания ВД; v – относительная частота вращения ВД; $I_{\text{с.мах}}$ – амплитуда синусоидального тока секции фазной обмотки; $I_{\text{с.пр}}$ – амплитуда прямоугольного тока секции фазной обмотки; $\alpha_{\text{вкл}} = \alpha_{2c} - \alpha_{1c}$ – угол поворота ротора ВД, соответствующий длительности прямоугольного тока в секции фазной обмотки; α_{1c} , α_{2c} – углы поворота ротора ВД, при которых происходит подключение и отключение секции фазной обмотки, отсчитываемые от момента перехода её ЭДС вращения через нуль.

Приравнявая (3) и (5), получим соотношение между амплитудами синусоидального и прямоугольных фазных токов с заданным углом включения $\alpha_{\text{вкл}}$

$$I_{\text{с.пр}} = I_{\text{с.мах}} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha_{\text{вкл}}}}. \quad (7)$$

Выражение (6) после подстановки в него (7) принимает вид

$$P_{\text{эм.с.пр}} = \frac{2}{\pi} U_{\text{п}} v I_{\text{с.мах}} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha_{\text{вкл}}}} \sin \frac{\alpha_{\text{вкл}}}{2}. \quad (8)$$

На рис.1 представлены графические изображения зависимостей (7), (8), построенных в относительных единицах

$$I_{\text{с.пр}}^* = \frac{I_{\text{с.пр}}}{I_{\text{с.мах}}}, \quad P_{\text{эм.с.пр}}^* = \frac{P_{\text{эм.с.пр}}}{P_{\text{эм.с.син}}}.$$

Анализ приведенных на рис. 1 кривых показывает, что при фиксированном действующем значении прямоугольных фазных токов развиваемая ВД электромагнитная мощность имеет максимум. Исследуя на экстремум выражение (8), получим трансцендентное уравнение

$$\text{tg} \frac{\alpha_{\text{вкл}}}{2} = \alpha_{\text{вкл}}.$$

Решением этого уравнения численными методами будет оптимальный угол включения секций фазных обмоток $\alpha_{\text{вкл.опт}} = 1330$, при котором развиваемая ВД с

прямоугольными фазными токами электромагнитная мощность будет максимальна и составляет 96% электромагнитной мощности ВД с синусоидальными токами, а амплитуда прямоугольного тока будет равна $I_{с.пр} = 0,821 I_{с.мах}$.

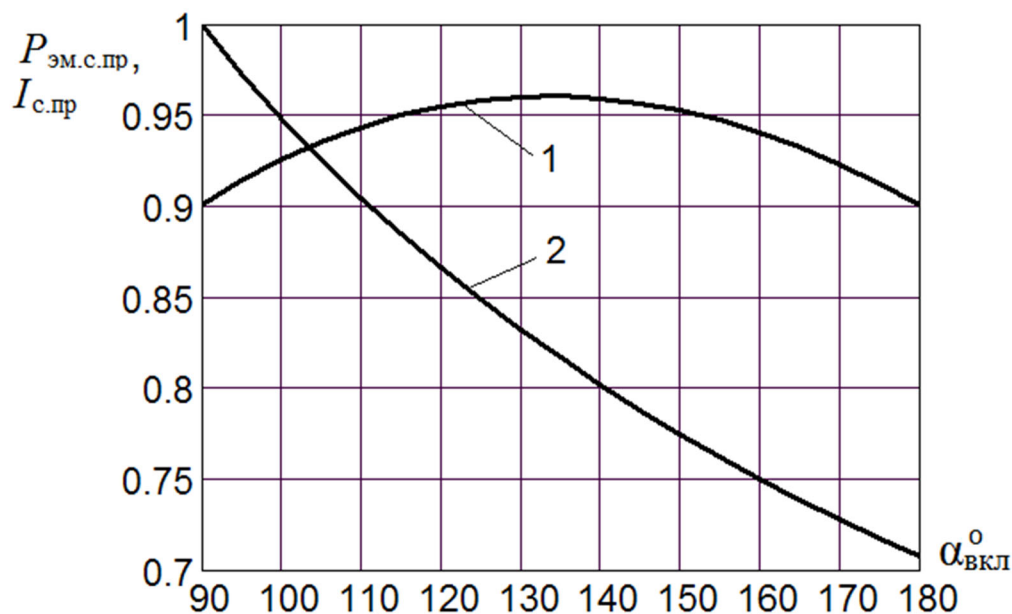


Рис. 1. Зависимости $I_{с.пр}^*$, $P_{эм.с.пр}^*$ от авкл при $\Delta P_{м.с.пр} = \Delta P_{м.с.син}$:
1 – $P_{эм.с.пр}^*(авкл)$; 2 – $I_{с.пр}^*(авкл)$

Указанное значение угла авкл.опт является оптимальным только по критерию максимальной электромагнитной мощности ВД при равенстве мощностей потерь в меди в фазных обмотках ВД и не учитывает выполнение других требований, таких как простота технических решений, реализующих в ЭМ прямоугольные фазные токи с необходимым авкл. Они зависят от числа фаз и схемы соединения фазных обмоток ВД.

В двухфазных ВД с дискретными ДПР и нереверсивным питанием фазных обмоток сравнительно просто реализуются прямоугольные фазные токи с авкл = 1800. При установке в ДПР второго комплекта чувствительных элементов могут быть получены прямоугольные фазные токи с авкл = 900. При этих углах включения электромагнитная мощность этого ВД будет равна 0,934 ее значению при авкл.опт., но амплитуды фазных токов $I_{с.пр}$ будут разные. В трехфазных ВД при нереверсивном питании фазных обмоток несложно сформировать фазные токи с авкл = 1800 и с авкл = 1200. При авкл = 1200 электромагнитная мощность трехфазного ВД составит 0,994 от ее значению при авкл.опт.

Полученные соотношения при условии равенства мощности потерь в меди фазных обмоток позволяют на этапе проектирования ВД с прямоугольными фазными токами оценить степень уменьшения его электромагнитной мощности по сравнению с её значением при синусоидальных фазных токах.

Список литературы:

1. Микроэлектронные электросистемы. Применения в радиоэлектронике./ Ю.И. Конев, Г.Н. Гулякович, К.П. Полянин и др.; Под ред. Ю.И. Конева. М.: Радио и связь, 1987. 240 с.
2. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями: Монография / Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 240 с.

References:

1. Microelectronic electrical systems. Applications in radio electronics. / Yu. I. Konev, G. N. Gulyakovich, K. P. Polyanin et al.; Under the editorship of Yu. I. Konev. Moscow: Radio and Communications, 1987. 240 p.
2. Electric servo drives with torque control of actuators: Monograph / Baranov M. V., Brodovsky V. N., Zimin A. V., Karzhavov B. N. Moscow: Publishing house of Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, 2006. 240 p.