

*component. Tripping characteristics of impedance modules are determined for different observation windows, starting from three samples. The protection's sensitivity to fault resistance is estimated by object characteristics. Aperiodic component of the short-circuit process results to the effect of increasing the sensitivity to the small observation window.*

Key words: *relay protection, training, simulation model, fast-operating*

## REFERENCES

1. Dyakov A.F., Lyamets Y.Y., Podshivalin A.N., Nudelman G.S., Zakonjsek J., Zhukov A.V. Intelligent relay protection development concept. – CIGRE Session, Paris, B5-115, 2010, pp. 1–5.
2. Kulikov A.L., Bezdushnyi D.I. *Releishchik – in Russ. (Relay Protector)*, 2016, No. 2, pp. 24–29.
3. Lyamets Yu.Ya., Martynov M.V., Nudel'man G.S., Romanov Yu.V., Voronov P.I. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 2, pp. 15–19; No. 3, pp. 12–18.
4. Lyamets Yu.Ya., Martynov M.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 10, pp. 16–22.
5. Lyamets Yu.Ya., Voronov P.I., Martynov M.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 10, pp. 13–20.
6. Patent RF No. 2594361. *Sposob releinoi zashchity energoob'yekta (A method of relaying power facility)/Yu.Ya. Lyamets, M.Yu. Shirokin, P.I. Voronov. Bulletin of inventions*, 2016, No. 23.
7. Lyamets Yu.Ya., Romanov Yu.V., Shirokin M.Yu. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 4, pp. 9–13.

\* \* \*

*Электричество, 2017, № 3, с. 33–37.*

## Бесконтактный двигатель постоянного тока с однополупериодной коммутацией

ГРИДИН В.М.

*Рассмотрен бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ) с трехсекционной якорной обмоткой (ЯО) и тремя силовыми транзисторами. Для того чтобы исключить прерывание тока в секциях ЯО двигателя после закрывания транзисторов и защитить их от перенапряжения, применены конденсаторы и индуктивная катушка. Конденсаторы перезаряжаются после закрывания транзисторов под действием накопленной энергии ЯО, а после открывания транзисторов – через индуктивную катушку. Исследованы переходные электромагнитные процессы в электрических цепях: с индуктивной катушкой и конденсатором после открывания транзисторов и с секцией ЯО и конденсатором после закрывания транзисторов. Получены выражения, позволяющие определять оптимальную ёмкость конденсаторов. Установлено, что мощность потерь в индуктивной катушке ничтожна по сравнению с электромагнитной мощностью. Приведён пример расчёта ёмкости конденсаторов. Применение конденсаторов и индуктивной катушки для защиты транзисторов от перенапряжения позволяет увеличить КПД бесконтактных двигателей с однополупериодной коммутацией и расширить область их применения.*

*Ключевые слова: бесконтактный двигатель постоянного тока, однополупериодная коммутация, защита транзисторов, переходные электромагнитные процессы, оптимальная ёмкость конденсаторов, потери в катушке*

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) по сравнению с обычными двигателями постоянного тока не имеют скользящих контактов и поэтому работают более надёжно. Обычно применяют БДПТ с трехсекционной якорной обмоткой (ЯО), шестью или тремя силовыми транзисторами, обеспечивающими соответственно двух- или однополупериодную коммутацию секций ЯО по положению ротора [1, 2]. Двигатели с трехсекционной ЯО и тремя силовыми транзисторами отличаются простотой транзисторного коммутатора, но относительно небольшим значением удельного момента (отношением вращающего момента к объёму электромеханической части двигателя) и невы-

соким КПД. По этим причинам такие БДПТ применяют при мощности примерно до 30 Вт.

В статье рассматривается предложенный в [3] альтернативный БДПТ с однополупериодной коммутацией, в котором с целью увеличения КПД и расширения области применения применена иная схема защиты силовых транзисторов от перенапряжения.

На рис. 1 изображены схемы силовой части известных и предлагаемого БДПТ.

При вращении вала двигателя транзисторы VT1–VT3 по сигналам датчика положения ротора поочередно подключают секции ЯО 1, 2, 3 к источнику питания и отключают их от источника. К ис-

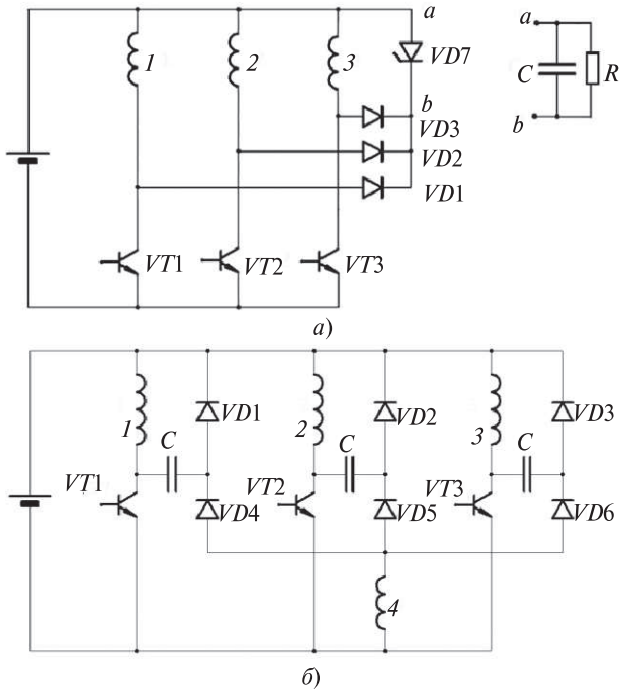


Рис. 1. Схема силовой части известных БДПТ (а) и предлагаемого (б): 1, 2, 3 – секции якорной обмотки; 4 – индуктивная катушка

точнику питания всегда подключена только одна секция ЯО.

Для того чтобы исключить прерывание тока в секциях ЯО после их отключения от источника питания и, следовательно, избежать перенапряжения, на силовых транзисторах в схеме на рис. 1,а применены диоды VD1–VD3 и стабилитрон VD7 [1] или диоды VD1–VD3, конденсатор ёмкостью C и резистор с сопротивлением R [2], а в схеме на рис. 1,б – диоды VD1–VD6, индуктивная катушка 4 и три конденсатора ёмкостью C [3]. Применять сложные и дорогие транзисторные ключи с собственной защитой от перенапряжения в мало-мощных БДПТ с простым коммутатором нецелесообразно.

В схеме на рис. 1,а энергия, накопленная в секциях ЯО к моменту отключения их от источника питания, бесполезно теряется в стабилитроне VD7 или в резисторе R. Кроме того, в резисторе теряется также энергия, обусловленная действием ЭДС вращения в отключенных секциях ЯО после изменения знака ЭДС. При этом создается отрицательная (тормозная) составляющая момента двигателя. Поэтому КПД БДПТ на рис. 1,а весьма незначительный. Двигатель на рис. 1,б не содержит резистор или стабилитрон, поэтому его КПД принципиально выше и больше мощность – примерно до 40–60 Вт, что расширяет область его применения.

На рис. 2 показаны примерные осциллограммы однополярных напряжения питания U, ЭДС вращения e и тока i в секции ЯО.

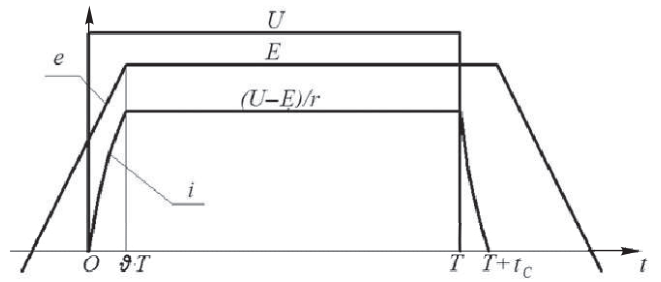


Рис. 2. Примерные осциллограммы напряжения питания U, ЭДС вращения e и тока i в секции якорной обмотки

Осциллограммы показаны для благоприятного случая, когда форма тока совпадает с формой ЭДС, электромагнитный КПД при этом максимален. Как видно из рис. 2, после подключения секции ЯО к источнику питания за время  $\vartheta T$  ЭДС e достигает максимального значения E, а ток в секции i – установившегося значения I, равного  $(U-E)/r$ . На рис. 2: T – длительность подключения секции к источнику питания;  $3T$  – период коммутации;  $t_c$  – время спада тока до нуля;  $\vartheta$  – относительный угол опережения коммутации; r – активное сопротивление секции ЯО:

$$T = \frac{60}{3pn} = \frac{20}{pn}; \quad \vartheta = \frac{3p\theta_d}{2\pi},$$

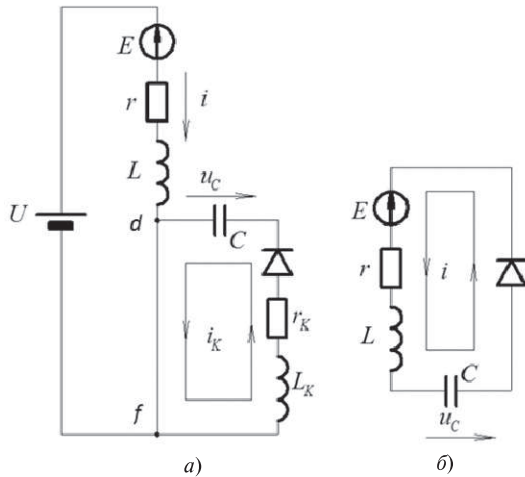
где  $\theta_d$  – оптимальный угол смещения датчика положения ротора из нейтрального положения против направления вращения вала двигателя с целью увеличения его мощности и КПД; p – число пар полюсов; n – число оборотов в минуту вала двигателя.

Углы  $\theta_d$  и  $\vartheta$  тем больше, чем больше мощность и частота вращения вала двигателя, т.е. чем меньше отношение  $\beta = T/\tau$  [1], где  $\tau = L/r$  – постоянная времени ЯО; L – индуктивность секций ЯО; так как  $t_c \approx \vartheta T$ , то электромагнитная мощность БДПТ  $P_{эм}$  примерно равна произведению EI.

Рассмотрим переходные электромагнитные процессы БДПТ (рис. 1,б) и определим оптимальное значение емкости конденсаторов, а также оценим мощность, теряемую в индуктивной катушке. На рис. 3 показаны электрические цепи при подключении секции ЯО к источнику питания и при отключении от него.

Открытый транзистор условно показан в виде перемычки df, секция ЯО представлена в виде активного сопротивления r, индуктивности L и ЭДС вращения E. На открытом транзисторе и диодах пренебрегаем падением напряжения, которое значительно меньше напряжения питания U.

Перед открытием транзистора напряжение на конденсаторе  $u_C$  равно ЭДС E. Это очевидно из рис. 3,б и рис. 2, если представить, что ЭДС E име-



**Рис. 3.** Электрические цепи при подключении секции ЯО к источнику питания (а) и при отключении ее от источника питания (б)

ет направление и значение, противоположные указанным. После открытия транзистора (рис. 3,а), начиная с момента времени  $t=0$ , протекают токи  $i$  в секции ЯО и  $i_k$  в индуктивной катушке, а конденсатор перезаряжается через индуктивную катушку. При этом напряжение  $u_C$  изменяется от положительного значения до отрицательного. Для электрической цепи на рис. 3,а с конденсатором и катушкой, имеющей активное сопротивление  $r_k$  и индуктивность  $L_k$ , справедливо уравнение равновесия напряжений:

$$L_k \frac{di_k}{dt} + r_k i_k - u_C = 0.$$

Решение этого уравнения [4]:

$$u_C = \frac{E}{\omega_k \sqrt{L_k C}} e^{-\delta_k t} \sin(\omega_k t + \varphi_k);$$

$$i_k = -C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{\omega_k L_k} e^{-\delta_k t} \sin \omega_k t,$$

где коэффициент затухания

$$\delta_k = \frac{T_k}{2L_k} = \frac{\omega_k}{2D};$$

угловая частота колебательного процесса

$$\omega_k = \sqrt{\frac{1}{L_k C} - \delta_k^2};$$

добротность катушки

$$D = \frac{\omega_k L_k}{T_k};$$

$$\varphi_k = \arctg(\omega_k / \delta_k) = \arcsin(\omega_k \sqrt{L_k C}).$$

Время спада тока  $i_k$  до нуля и перезарядки конденсатора  $t_k = \pi / \omega_k$ .

По истечении этого времени переходный процесс прекращается, так как обратному току препятствует диод.

Напряжение на конденсаторе после его перезарядки за время  $t_k$

$$u_C(t_k) = -E e^{-\delta_k t_k} = -\mu E; \quad \mu = e^{-\pi/(2D)}.$$

При  $D=25$  значение  $\mu=0,94$ , при  $D=50$  —  $\mu=0,97$ , при  $D=75$  —  $\mu=0,98$ .

Для того чтобы упростить выражения для напряжения на конденсаторе в момент закрытия транзистора (см. ниже), будем считать  $\mu=1$ ,  $u_C(t_k) = -E$ .

Из выражений для  $\delta_k$  и  $\omega_k$  можно найти

$$\omega_k^2 = \frac{1}{L_k C} / \left(1 + \frac{1}{4D^2}\right).$$

Так как  $\frac{1}{4D^2} \ll 1$ , то полагаем

$$\omega_k = \sqrt{\frac{1}{L_k C}}.$$

Максимальный ток в катушке

$$I_{km} = \frac{E}{\omega_k L_k} = E \sqrt{\frac{C}{L_k}}.$$

Мощность потерь в катушке

$$\Delta P_k = I_{km}^2 r_k \frac{t_k}{2T} = \frac{\pi C E^2}{2TD}.$$

Например, для  $E = 24$  В,  $I = 2$  А, т.е. для  $P_{ЭМ} = 48$  Вт,  $n = 3000$  об/мин,  $p = 2$ , т.е.  $T = 0,00333$  с, можно получить значение  $C = 7,3$  мкФ (см. ниже пример расчета). А если при этом  $D = 25$ , то  $\Delta P_k = 0,08$  Вт  $\ll 48$  Вт. Для  $C = 40$  мкФ, т.е. для значительно большей мощности БДПТ,  $\Delta P_k = 0,44$  Вт. Следовательно, мощность потерь в индуктивной катушке ничтожна по сравнению с электромагнитной мощностью.

После закрытия транзистора (рис. 3,б), начиная с момента времени  $t=0$ , конденсаторы перезаряжаются под действием накопленной энергии ЯО, при этом напряжение  $u_C$  изменяется от отрицательного значения до положительного. Для электрической цепи с конденсатором и секцией ЯО, имеющей активное сопротивление  $r$  и индуктивность  $L$ , справедливо уравнение равновесия напряжений:

$$L \frac{di}{dt} + ri + u_C = -E.$$

Решение этого уравнения:

$$u_C = A e^{-\delta t} \sin(\omega_k t + \Psi),$$

где  $\delta = \frac{r}{2L}$ ;  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}$ .

Постоянные интегрирования  $A$  и  $\Psi$  определяем из начальных (нулевых) условий:

$$u_C(0) = A \sin \Psi - E = u_C(t_k) = -E.$$

Следовательно,

$$\Psi = 0; u_C = Ae^{-\delta t} \sin \omega t - E;$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} = CAe^{-\delta t} (-\delta \sin \omega t + \omega \cos \omega t);$$

$$i(0) = I = (U - E) / r = CA\omega.$$

Отсюда

$$A = \frac{1}{C\omega}; u_C = \frac{I}{C\omega} e^{-\delta t} \sin \omega t - E.$$

Так как

$$\delta = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{LC}}; \omega = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{LC}}; \varphi = \arctg\left(\frac{\omega}{\delta}\right),$$

то  $i = -\frac{I}{\omega\sqrt{LC}} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \varphi)$ .

Время спадания тока  $i$  до нуля и перезаряда конденсатора  $t_c = \varphi / \omega$ .

По истечении этого времени переходный процесс прекращается, так как обратному току препятствует диод.

Напряжение на конденсаторе после его перезаряда за время  $t_c$

$$u_C(t_c) = \frac{I}{C\omega} e^{-\delta t_c} \sin \varphi - E = I \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\delta t_c} - E.$$

На рис. 4 показаны наблюдаемые при компьютерном моделировании осциллограммы напряжения на конденсаторе  $u_C$  и токов через него  $i_k, i$  при открытом и при закрытом транзисторе.

При правильном выборе емкости  $C$  напряжение  $u_C(t_c)$  должно быть равно ЭДС  $E$ . Из этого условия получим выражение для емкости конденсаторов

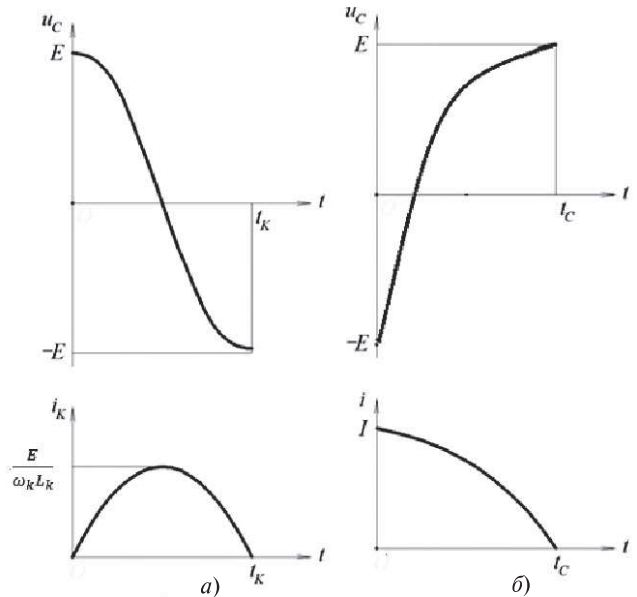
$$C = \frac{LI^2 e^{-2\delta t_c}}{4E^2}.$$

Так как

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}; t_c = \frac{\arctg(\omega / \delta)}{\omega},$$

то последние три выражения позволяют определить емкость конденсаторов с помощью компьютера или численным методом, например методом итераций.

*Пример расчета емкости конденсаторов.* Исходные данные:  $P_{ЭМ} = 48$  Вт,  $n = 3000$  об/мин,



**Рис. 4.** Осциллограммы напряжения на конденсаторе  $u_C$  и токов через него  $i_k, i$  при открытом (а) и при закрытом (б) транзисторах

$p=2, U=30$  В; дополнительно принимаем  $E/U = 0,8$  и  $\beta = \frac{T}{L/r} = 2$ , примерно соответствующие заданной электромагнитной мощности [1].

Вычисляем  $E = 0,8U = 24$  В,  $I = P_{ЭМ} / E = 2$  А;  $r = \frac{U - E}{I} = 3$  Ом;  $T = \frac{20}{pn} = 0,003333$  с;  $L = \frac{rT}{\beta} = 0,005$  Гн;

$$\delta = \frac{r}{2L} = 300 \text{ 1/с.}$$

Решив приведенную выше систему трех уравнений с неизвестными  $C, \omega, t_c$ , определим:  $C = 7,3$  мкФ. Кроме того, получим:  $\omega = 5230$  1/с;  $t_c = 0,00029$  с;  $t_c / T = 0,08$ ;  $I_{km} = 0,92$  А; при  $D = 25$  значение  $\Delta P_k = 0,08$  Вт  $\ll 48$  Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. — М.: Энергия, 1975, 128 с.
2. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебное пособие для вузов. — М.: Изд-во МЭИ, 2003, 424 с.
3. Гридин В.М., Лозенко В.К. Авторское свидетельство на изобретение № 1380354 от 5.10.1970. Открытия. Изобретения, 1974, № 34.
4. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебное пособие для вузов, кн. 1. — М.: Энергоатомиздат, 1995, 240 с.

[27.10.2016]

*Автор: Гридин Владимир Михайлович окончил Московский энергетический институт в 1963 г. Кандидатскую диссертацию «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией» защитил в 1979 г. Доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.*