

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ЗАМКНУТОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Л.Т. Волков, А.В. Резниченко, В.Н. Коропатюк
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассматривается поведение энергетических показателей, динамических свойств и надежности работы замкнутого вентильного электропривода в условиях воздействия на него внешних случайных возмущений: колебаний напряжения в питающей сети и момента статической нагрузки на валу двигателя. Предложена методика вероятностного анализа изменений коэффициента передачи вентильного преобразователя и описаны возможные негативные последствия этих изменений.

Возмущения, действующие на электропривод, — колебания напряжения силовой сети $V_1(t)$ и момент статической нагрузки $M_{ст}(t)$ — в данной работе представлены случайными величинами соответственно V_1 и $M_{ст}$.

Пусть заданному углу регулирования α и номинальному напряжению силовой сети, $V_1 = 0$, соответствует рабочая точка A на естественной статической характеристике силового блока вентильного преобразователя, кривая 1 на рис. 1.

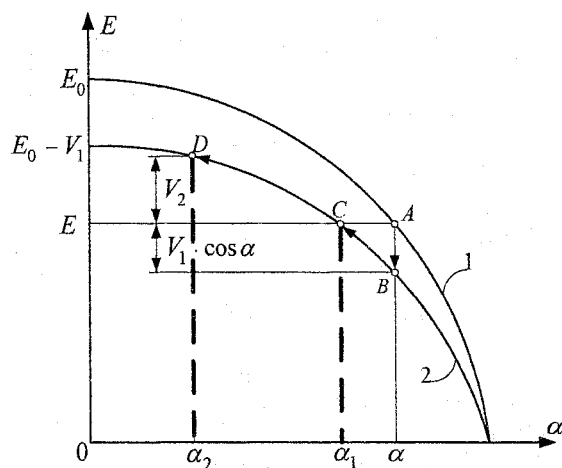


Рис. 1. Влияние колебаний напряжения сети и момента статической нагрузки на положение рабочей точки силового блока вентильного преобразователя

Статическая характеристика силового блока вентильного преобразователя $E(\alpha)$ описывается следующим выражением:

$$E = E_0 \cdot \cos \alpha. \quad (1)$$

Коэффициент передачи силового блока найдем из формулы (1), переписав ее следующим образом:

$$K = \frac{\partial E}{\partial \alpha} = -E_0 \cdot \sin \alpha = -\sqrt{E_0^2 - E_A^2}, \quad (2)$$

где E_A — значение выходной ЭДС преобразователя E в точке A .

При понижении напряжения силовой сети на величину V_1 характеристика $E(\alpha)$ изменит свое положение и будет изображаться кривой 2 (рис. 1). Рабочая точка преобразователя при этом переместится из A в B , где согласно выражения (1) ЭДС $E = E_B$ будет меньше E_A на величину $V_1 \cdot \cos \alpha$, а коэффициент передачи запишется

$$K = -\frac{E_0 - V_1}{E_0} \cdot \sqrt{E_0^2 - E_A^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим изменение коэффициента передачи K при работе вентильного преобразователя в электроприводе с замкнутой астатической САР поддержания заданной скорости n (ЭДС E_0) двигателя.

При работе электропривода на холостом ходу (х.х.), если пренебречь током х.х., ЭДС преобразователя E равна ЭДС двигателя E_0 . Тогда при $V_1 = 0$ согласно формуле (2)

$$K = -\sqrt{E_0^2 - E_0^2}. \quad (4)$$

Если рабочая точка преобразователя при этом находилась в A , то при понижении напряжения силовой сети на величину V_1 она будет стремиться перейти в точку B . Однако под действием САР ЭДС преобразователя восстанавливается до значения E_0 . Рабочая точка при этом переместится в C , где коэффициент передачи силового преобразователя

$$K = -\sqrt{(E_0 - V_1)^2 - E_0^2}. \quad (5)$$

При появлении нагрузки на валу двигателя, чтобы поддержать скорость неизменной, САР изменит ЭДС преобразователя на величину V_2 , равную падению напряжения в силовой цепи преобразователь—двигатель $I \cdot r_a$. Рабочая точка преобразователя при этом переместится в D , а коэффициент передачи в данной точке будет

$$K = -\sqrt{(E_0 - V_1)^2 - (E_0 + V_2)^2}. \quad (6)$$

Таким образом, коэффициент передачи силового блока вентильного преобразователя в данном случае уменьшается не только за счет снижения напряжения сети на величину V_1 , но также и из-за падения напряжения в силовой цепи, вызванного током нагрузки двигателя.

Повышение напряжения сети на величину V_1 будет, наоборот, вызывать увеличение коэффициента передачи. В выражениях (5) и (6) при этом перед V_1 будет стоять знак плюс.

В общем случае при $E_0 = \text{const}$

$$K = -\sqrt{(E_0 + V_1)^2 - (E_0 + V_2)^2} = K(V_1, V_2). \quad (7)$$

Выражение (7) имеет смысл при выполнении неравенства

$$(E_0 + V_2)^2 \leq (E_0 + V_1)^2. \quad (8)$$

Так как суммы стоящие в скобках обеих частей неравенства положительны, то можно записать

$$E_0 + V_2 \leq E_0 + V_1, \quad (9)$$

или

$$V_2 - V_1 \leq E_0 - E_0. \quad (10)$$

Из рис. 1 видно, что при снижении напряжения сети на величину V_1 и появлении падения напряжения в силовой цепи V_2 угол регулирования α сначала уменьшается до значения α_1 , а затем — до α_2 . В результате, коэффициент передачи K снижается и при $\alpha = 0$ $K = 0$. Равенство коэффициента передачи нулю будет иметь место при выполнении соотношения

$$V_2 - V_1 \geq E_0 - E_0. \quad (11)$$

Таким образом, коэффициент передачи силового блока вентильного преобразователя, работающего в электроприводе с замкнутой астатической САР,

$$K(V_1, V_2) = \begin{cases} -\sqrt{(E_0 + V_1)^2 - (E_0 + V_2)^2}, & \text{если } V_2 - V_1 \leq E_0 - E_0, \\ 0, & \text{если } V_2 - V_1 \geq E_0 - E_0. \end{cases} \quad (12)$$

представляет собой, при $E_0 = \text{const}$, функцию двух случайных аргументов V_1 и V_2 . Нелинейная зависимость коэффициента передачи от величин V_1 и V_2 обусловлена нелинейным характером статической характеристики силового блока преобразователя $E(\alpha)$.

В связи с тем, что рассматриваемая функция $K(V_1, V_2)$ является нелинейной, то наиболее интересующей информацией о ее поведении в зависимости от значений случайных величин V_1 и V_2 будет служить функция распределения $F(K)$ или плотность вероятности $f(K)$.

Для удобства последующего анализа и большей общности полученных результатов проинтегрируем уравнение (12) относительно E_0 , тогда получим

$$K(V_1, V_2) = \begin{cases} -\sqrt{(1+V_1)^2 - (E_0 + V_2)^2}, & \text{если } V_2 - V_1 \leq 1 - E_0, \\ 0, & \text{если } V_2 - V_1 \geq 1 - E_0. \end{cases} \quad (13)$$

Учитывая, что функция $K(V_1, V_2)$ не знакопеременная, можно рассматривать ее по модулю. На основании вышесказанного и формулы (13) построена область определения функции $K(V_1, V_2)$ на плоскости V_1, V_2 (рис. 2). Положение верхней границы области зависит от величин K и E_0 . При фиксированном значении E_0 указанная граница будет тем выше, чем больше коэффициент передачи K . Положение нижней границы — прямой линии, соответствующей уравнению

$$V_2 - V_1 = 1 - E_0, \quad (14)$$

зависит только от значения ЭДС двигателя E_0 . На этой границе и ниже коэффициент передачи преобразователя равен нулю и, следовательно, система электропривода размыкается. На полуплоскости, расположенной ниже прямой (14), функции $F(K)$ и $f(K)$ равны нулю. Следовательно, на основании вышесказанного [1],

$$F(K) = P((V_1, V_2) \in G) = \iint_G f(V_1, V_2) dV_1 dV_2, \quad (15)$$

то есть, вероятность того, что случайная точка (V_1, V_2) попадет в заштрихованную область G , где выполняется неравенство $K(V_1, V_2) < K$, равна двойному интегралу по области G от совместной плотности вероятностей системы величин (V_1, V_2) . Здесь K — значение коэффициента передачи на верхней границе области G , а $K(V_1, V_2)$ — его значение внутри области G .

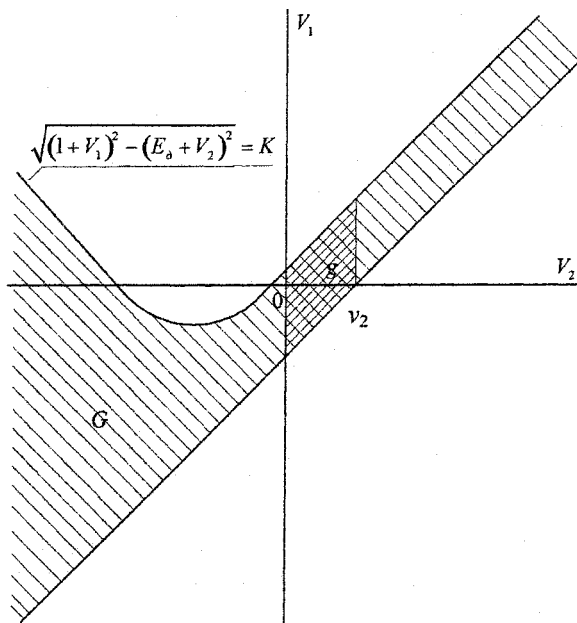


Рис. 2. Область определения функции $K(V_1, V_2)$ на плоскости V_1, V_2

Для определения пределов интегрирования в формуле (15) на основании уравнения кривой верхней границы области G (см. рис. 2) найдем выражение для V_1

$$V_1 = \sqrt{K^2 + (E_0 + V_2)^2} - 1. \quad (16)$$

Тогда на основании равенств (15), (14) и (16), запишем

$$F(K) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{E_0 + V_2 - 1}^{\sqrt{K^2 + (E_0 + V_2)^2} - 1} f(V_1, V_2) dV_2. \quad (17)$$

Дифференцируя выражение (17) по переменной K , входящей в верхний предел внутреннего интеграла, получим

$$f(K) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K}{\sqrt{K^2 + (E_0 + V_2)^2}} f(\sqrt{K^2 + (E_0 + V_2)^2} - 1, V_2) dV_2. \quad (18)$$

Область определения функции $K(V_1, V_2)$ G , где случайная величина V_2 изменяется от $-\infty$ до ∞ (см. рис. 2), носит сугубо теоретический характер. На практике же падение напряжения в силовой цепи V_2 , как и ток двигателя, не знакопеременная величина. Для нормальных режимов работы вентильного электропривода непрерывных прокатных станков, когда ток двигателя не превосходит допустимых значений, величина V_2 изменяется в пределах от нуля до 15...20 % по отношению к ЭДС E_0 (в относительных единицах). В связи с этим реальная область определения коэффициента передачи силового блока вентильного преобразователя (см. область g на рис. 2) по переменной V_2 ограничена осью ординат и некоторым положительным значением этой переменной $V_2 = v_2$. Пределы $-\infty, \infty$ в интегралах (17), (18) изменятся соответственно на 0, v_2 .

При нормальном распределении случайных величин V_1 и V_2 , совместная их плотность распределения, то есть плотность распределения случайного вектора (V_1, V_2) , запишется

$$f(V_1, V_2) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sqrt{1 - r_{12}^2}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2 \cdot (1 - r_{12}^2)} \left[\frac{(V_1 - m_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2 \cdot r_{12} \cdot (V_1 - m_1) \cdot (V_2 - m_2)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} + \frac{(V_2 - m_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\}. \quad (19)$$

Решение интегралов (17), (18) с учетом выражения (19) может быть получено только численными методами.

На рис. 3 приведены графики плотности распределения коэффициента передачи K . При этом использованы параметры системы случайных вели-

чин (V_1, V_2) , а также значение ЭДС двигателя E_0 , полученные экспериментальным путем на непрерывном среднесортном прокатном стане 350/500 Златоустовского металлургического завода:

$$m_1 = 0, m_2 = 0,12, \sigma_1 = 0,01 \div 0,03,$$

$$\sigma_2 = 0,01 \div 0,03, r_{12} = -0,67 \text{ и } E_0 = 0,796.$$

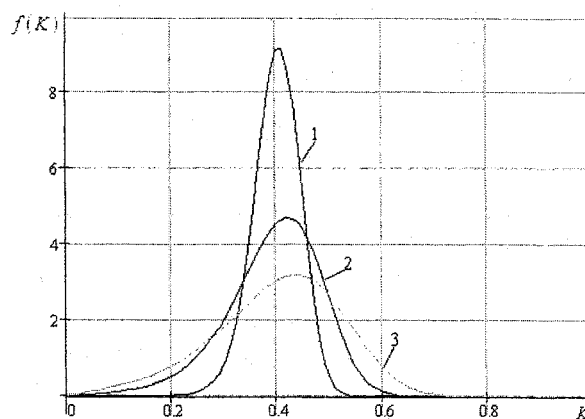


Рис. 3. Плотность распределения коэффициента передачи силового блока вентильного преобразователя при 1) $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,01$; 2) $\sigma_1 = 0,01$; $\sigma_2 = 0,03$; 3) $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,03$

Как следует из графиков рис. 3 с увеличением степени рассеивания случайных аргументов V_1 и V_2 закон распределения $f(K)$ существенно деформируется. Так, при относительно малом рассеивании аргументов ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0,01$, кривая 1) плотность вероятности $f(K)$ близка к нормальному закону. По мере увеличения параметров σ_1 и σ_2 плотность вероятности $f(K)$ все больше отличается от нормального закона, при этом значительно возрастает отрицательная асимметрия (кривые 2 и 3), а мода несколько уменьшается. Как следствие, коэффициент передачи вентильного преобразователя приближается к нулевым значениям, что может привести к размыканию САР электропривода. Это особенно опасно для непрерывных прокатных станков. А именно при размыкании САР происходит нарушение соотношения скоростей соседних клеток, в результате чего происходит либо разрыв прокатываемого металла, либо наматывание его на валки стана, а это означает крупную аварию с опасностью для жизнедеятельности персонала и значительные экономические ущербы.

Выводы

С точки зрения улучшения энергетических показателей вентильного электропривода необходимо устанавливать угол регулирования α как можно меньше, так как он приблизительно равен углу сдвига между током и напряжением в питающей сети. Тогда уровень потребления реактивной мощности из сети будет минимальным. С дру-

гой стороны для улучшения динамических свойств и надежности работы вентильного электропривода угол регулирования α должен быть как можно больше. Таким образом, здесь приходится иметь дело с двумя взаимоисключающими факторами. Для того чтобы эти факторы сбалансировать, необходимо решить оптимальную задачу. Результатом решения такой задачи должна быть разрабо-

тана четкая рекомендация по установке начального угла регулирования α , что равносильно выбору оптимального запаса по напряжению вентильного преобразователя.

Литература

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 2001.

Волков Леонид Тихонович в 1966 году окончил Челябинский политехнический институт (ныне Южно-Уральский государственный университет). В 1979 году в Челябинском политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию по влиянию случайных возмущений на системы автоматического управления вентильных электроприводов постоянного тока. Доцент кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ.

Резниченко Алексей Васильевич студент Южно-Уральского государственного университета, энергетического факультета, специальности «Электроснабжение», кафедры «Системы электроснабжения».

Коропатюк Виктория Николаевна студентка Южно-Уральского государственного университета, энергетического факультета, специальности «Электроснабжение», кафедры «Системы электроснабжения».