

## Преобразование механической характеристики асинхронных двигателей

ГРИДИН В.М.

*Рассмотрен способ преобразования жесткой механической характеристики в мягкую у асинхронных двигателей, дополнительно снабженных преобразователем частоты, широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и датчиком тока. В ШИМ напряжение датчика, пропорциональное разности значений потребляемого тока и тока холостого хода, сравнивается со значением периодического пилообразного напряжения, и происходит формирование импульсов напряжения, подаваемого на вход преобразователя. При увеличении момента на валу и, следовательно, потребляемого тока уменьшаются среднее значение напряжения на входе преобразователя, напряжение питания двигателя, частота его изменения и частота вращения вала. Описана совместная работа ШИМ и датчика тока, сформулированы требования к их напряжениям. Получено выражение для преобразованной механической характеристики. Приведен пример преобразования механической характеристики асинхронного двигателя. Рассчитаны характеристики такого двигателя. Рассматриваемый двигатель в сравнении с двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением обеспечивает меньшее изменение мощности при изменении момента нагрузки от 0,5 до 1,5 номинального значения.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, мягкая характеристика, способ преобразования, модулятор, датчик тока, преобразователь частоты

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются наиболее надежными и дешевыми машинами. Они имеют жесткую механическую характеристику. При такой характеристике и увеличении момента нагрузки частота вращения вала двигателя уменьшается незначительно, т.е. мощность увеличивается почти пропорционально моменту [1–3]. Это неприемлемо для привода, например, электрического транспорта, подъемных и других устройств, для них требуются двигатели с мягкой механической характеристикой, при которой автоматически снижается частота вращения вала при увеличении момента нагрузки. Благодаря этому мощность таких двигателей изменяется значительно меньше, чем у обычных АД.

Мягкую механическую характеристику имеют двигатели постоянного тока (ДПТ) с последовательным возбуждением, т.е. с последовательно соединенными якорной обмоткой и обмоткой возбуждения. При изменении момента нагрузки изменяется не только ток якоря, но и магнитный поток, а изменение последнего смягчает механическую характеристику. Однако из-за наличия скользящих контактов в виде щеточно-коллекторного узла ДПТ менее надежны, чем АД.

Мягкую механическую характеристику АД получить непросто. Для изменения частоты вращения вала нужно одновременно изменять напряжение питания двигателя и частоту его изменения с помощью преобразователя частоты (ПЧ), при этом

механическая характеристика останется жесткой [1–3].

Целью настоящей статьи является решение актуальной задачи – рассмотрение возможности получения мягкой механической характеристики АД, у которых при увеличении момента нагрузки автоматически снижаются напряжение питания и его частота, а следовательно, и частота вращения вала. С этой целью рассматривается АД, который дополнительно снабжен ПЧ, широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и датчиком тока (ДТ).

Разработанные в СССР ПЧ имеют три значения частоты трехфазного выходного напряжения, подаваемого на трехфазную обмотку АД: номинальное  $f_n$ , наибольшее  $f_{нб}$  и наименьшее  $f_{нм}$ ;  $\frac{f_n}{f_{нб}} = \frac{2}{3}$ ,

$\frac{f_n}{f_{нм}} = 15$  [4]. Указанным частотам пропорциональ-

ны номинальное, наибольшее и наименьшее значения частоты вращения магнитного поля статора.

На рис. 1 показаны напряжения, поясняющие совместную работу ШИМ и ДТ:  $u_y$  – однополярное напряжение ДТ, пропорциональное разности потребляемого тока и тока холостого хода  $I$ ;  $u_{y,\min}$ ,  $u_{y,\max}$  – минимальное и максимальное значения этого напряжения. Максимальное напряжение ДТ  $u_{y,\max}$  (рис. 1) должно соответствовать пусковому току и пусковому (максимальному) моменту  $M_{\max}$ . В ШИМ напряжение  $u_y$  сравнивается с периодиче-

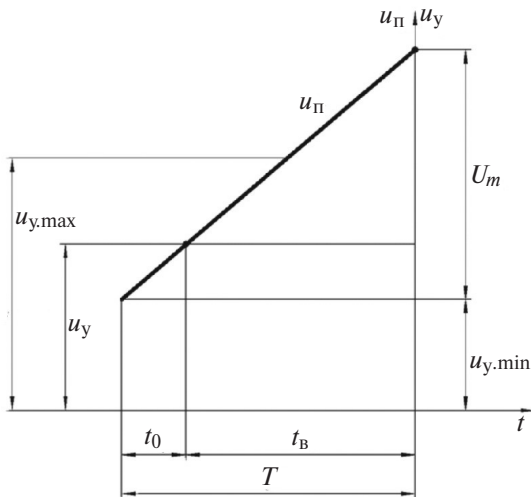


Рис. 1. Напряжения, поясняющие совместную работу ШИМ и ДТ

ским пилообразным напряжением  $u_{\text{п}}$ , изменяемым по закону  $u_{\text{п}} = u_{\text{у,min}} + U_m t / T$ , где  $T$  — период повторения напряжения  $u_{\text{п}}$  (рис. 1).

Напряжения  $u_{\text{у}}$  и  $u_{\text{п}}$  подаются на разные входы компаратора, который может быть выполнен на основе операционного усилителя. Выход компаратора соединен со входом ПЧ. При  $u_{\text{п}} < u_{\text{у}}$  напряжение на выходе компаратора и входе ПЧ отсутствует в течение времени  $t_0$ , зависящего от напряжения  $u_{\text{у}}$ , т.е. от тока  $I$ . При  $u_{\text{п}} \geq u_{\text{у}}$  действует напряжение на выходе компаратора и входе ПЧ в течение времени  $t_{\text{в}}$  (рис. 1). Очевидно, чем больше ток  $I$  и, соответственно, напряжение  $u_{\text{у}}$ , тем меньше время  $t_{\text{в}}$  и отношение  $\gamma = t_{\text{в}} / T$ . Следовательно меньше среднее на периоде  $T$  напряжение на выходе компаратора и входе ПЧ, напряжение питания АД, его частота и частота вращения вала.

Для отношения  $\gamma$  согласно рис. 1 справедливо следующее выражение:

$$\gamma = (U_m + u_{\text{у,min}} - u_{\text{у}}) / U_m = 1 - (u_{\text{у}} - u_{\text{у,min}}) / U_m.$$

При равенстве напряжений  $u_{\text{у,max}}$  и  $U_m$

$$\gamma = 1 - (u_{\text{у}} - u_{\text{у,min}}) / u_{\text{у,max}}.$$

Будем считать, что момент нагрузки  $M$  пропорционален разности потребляемого тока и тока холостого хода, обозначаемой как ток  $I$ , и, следовательно, пропорционален напряжению ДТ  $u_{\text{у}}$  (см. выше). В АД отношение тока холостого хода к номинальному току весьма велико и согласно [2] «возрастает с уменьшением мощности и частоты вращения и для двигателей мощностью от 1 до 100 кВт варьируется в пределах от 0,5 до 0,25, а в микродвигателях — от 0,5 до 1,0».

Очевидно,  $u_{\text{у}} = I / I_{\text{max}} = M / M_{\text{max}}$ , где  $I_{\text{max}}$ ,  $M_{\text{max}}$  — максимальные значения тока  $I$  и момента  $M$ . Будем использовать  $M_{\text{min}}$  — момент, соответ-

ствующий напряжению  $u_{\text{у,min}}$  на рис. 1 и указанный на рис. 2, тогда

$$u_{\text{у,min}} / u_{\text{у,max}} = M_{\text{min}} / M_{\text{max}} = v;$$

$$\gamma = 1 + v - \frac{M}{M_{\text{max}}}.$$

Представим  $M_{\text{min}} = K_{\text{min}} M_{\text{H}}$ ;  $M_{\text{max}} = K_{\text{max}} M_{\text{H}}$ ;  $K_{\text{min}} / K_{\text{max}} = v$ , где  $M_{\text{H}}$  — номинальный момент. Значение коэффициента  $K_{\text{max}} = M_{\text{max}} / M_{\text{H}}$  должно быть указано в техническом задании на преобразование механической характеристики АД. Для большинства АД  $K_{\text{max}} \geq 2$ . На рис. 2 изображена преобразованная механическая характеристика АД, где  $\omega$  — угловая частота вращения вала двигателя.

Характеристика на рис. 2 имеет два участка 1 и 2: первый в виде наклонного прямолинейного отрезка, второй в виде наклонных прямолинейного и криволинейного отрезков. Для линейной части жестких механических характеристик (при  $f = \text{const}$ ), т.е. примерно для  $M = 0 \div 1,5 M_{\text{H}}$ , справедливо выражение:

$$\omega = \gamma \omega_0 - c M,$$

где  $\omega_0 \approx \frac{2\pi f_{\text{H6}}}{p}$  — частота вращения вала двигателя

при наибольшем значении частоты напряжения питания  $f_{\text{H6}}$  и холостом ходе (приближенно считаем ее равной частоте вращения магнитного поля статора);  $p$  — число пар полюсов двигателя;  $\gamma$  — отношение частоты напряжения питания  $f$  к частоте  $f_{\text{H6}}$ , равное отношению  $t_{\text{в}} / T$  (см. рис. 1);  $c$  — крутизна жестких механических характеристик:

$$c = (\omega_{0\text{H}} - \omega_{\text{H}}) / M_{\text{п}} = s_{\text{H}} \omega_{0\text{H}} / M_{\text{H}},$$

где  $\omega_{0\text{H}} = \omega_0 \frac{f_{\text{H}}}{f_{\text{H6}}}$  — частота вращения вала двигателя

для при номинальной частоте напряжения питания

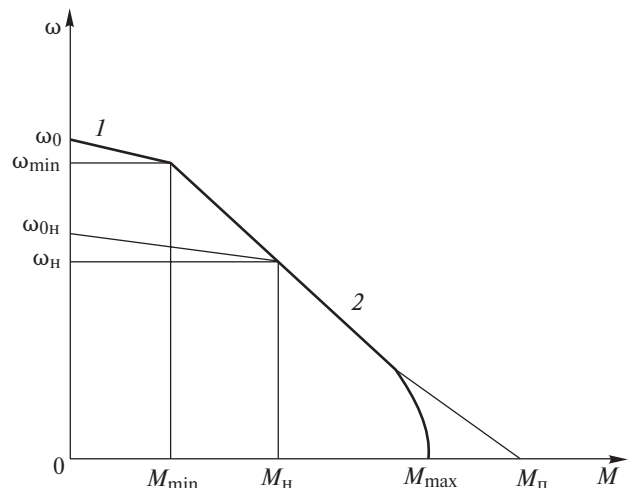


Рис. 2. Преобразованная механическая характеристика АД

$f_H$  и холостом ходе;  $\omega_H$  – номинальная частота вращения вала двигателя при номинальных частоте  $f_H$  и моменте нагрузки  $M_H$ ;  $s_H = 0,02 \div 0,08$  – номинальное значение скольжения ротора, которое тем меньше, чем больше КПД и мощность двигателя.

С учетом формулы для крутизны  $c$  получим общее выражение для линейной части жестких механических характеристик АД при  $M = 0 \div 1,5M_H$ :

$$\omega = \left( \gamma - d \frac{M}{M_H} \right) \omega_0; \quad d = s_H \frac{f_H}{f_{H6}}$$

На участке 1  $M = 0 \div M_{\min}$ ,  $f = f_{H6}$ ,  $\gamma = 1$ , напряжение на обмотке – наибольшее, а вал двигателя вращается с наибольшей частотой. Механическая характеристика описывается выражением:

$$\omega = \left( 1 - d \frac{M}{M_H} \right) \omega_0.$$

На участке 2  $M = M_{\min} \div M_{\max}$ , где  $M_{\max} = K_{\max} M_H$  – пусковой момент;  $M_{\Pi} = K_{\Pi} M_H$  – условный пусковой момент для сплошной прямолинейной характеристики (см. рис. 2);  $M_{\max} < M_{\Pi}$ ,  $K_{\max} < K_{\Pi}$  по причине нелинейной зависимости  $I(M)$  при  $f = \text{const}$  и  $M > 1,5M_H$ . При  $M \approx M_{\min} \div 1,5M_H$

$$\gamma = 1 + \nu - M / M_{\max}.$$

Очевидно, отношение  $\gamma$  и напряжение на обмотке уменьшаются при увеличении момента на валу.

С учетом формулы для  $\gamma$  получим выражение для механической характеристики при  $M \approx M_{\min} \div 1,5M_H$ :

$$\omega = \left( 1 + \nu - \frac{1 + dK_{\max}}{K_{\max}} \frac{M}{M_H} \right) \omega_0,$$

из которого видно, что при  $M \approx M_{\min} \div 1,5M_H$  частота вращения вала двигателя линейно зависит от момента на валу.

Для номинального режима работы двигателя ( $M = M_H$ ,  $\omega = \omega_H$ ):

$$\gamma = \gamma_H = 1 + \nu - \frac{1}{K_{\max}} = 1 - \frac{1 - K_{\min}}{K_{\max}} < 1;$$

$$g = \frac{\omega_H}{\omega_0} = 1 + \nu - \frac{1 + dK_{\max}}{K_{\max}}; \quad \omega_0 / \omega_H = 1 / g.$$

Из выражений для  $\nu$  и  $g$  получим формулы для коэффициентов:

$$K_{\min} = 1 - (1 - g - d)K_{\max};$$

$$K_{\max} = (1 - K_{\min}) / (1 - g - d),$$

которые показывают, что коэффициент  $K_{\min}$  тем больше, чем больше коэффициент  $K_{\max}$  и отношение  $g$  и что, изменяя коэффициент  $K_{\min}$ , можно изменять коэффициент  $K_{\max}$ .

Найдем другие выражения для коэффициентов  $K_{\min}$  и  $K_{\max}$ , а также для  $K_{\Pi}$ .

Так как преобразованная механическая характеристика АД проходит через две точки с координатами  $M_H$  и  $\omega_H$ ,  $M_{\Pi}$  и 0, то для ее прямолинейной части при  $M \approx M_{\min} \div 1,5M_H$  можно получить более простое выражение:

$$\omega = \frac{K_{\Pi} - \frac{M}{M_H}}{K_{\Pi} - 1} \omega_H.$$

Подставив в него  $M = M_{\min}$  и  $\omega = \omega_{\min} \approx \omega_0$  (см. рис. 2), получим выражения для коэффициентов:

$$K_{\min} \approx K_{\Pi} - \frac{\omega_0}{\omega_H} (K_{\Pi} - 1); \quad K_{\Pi} \approx \frac{\frac{\omega_0}{\omega_H} - K_{\min}}{\frac{\omega_0}{\omega_H} - 1};$$

где  $\frac{\omega_0}{\omega_H} = \frac{f_{H6}}{f_H} \frac{n_{0H}}{n_H} = \frac{f_{H6}}{f_H} \frac{1}{1 - s_H}$ ;  $n_H$  – номинальная частота вращения вала при  $f = f_H$  и  $M = M_H$ , об/мин;  $n_{0H}$  – частота вращения вала при  $f = f_H$  и холостом ходе, об/мин; при  $f_H = 50$  Гц значение  $n_{0H} = 3000 / p$  об/мин.

Из формулы для коэффициента  $K_{\Pi}$  видно, что, изменяя коэффициент  $K_{\min}$ , можно изменять коэффициент  $K_{\Pi}$ , а следовательно, коэффициент  $K_{\max}$  и пусковой момент  $M_{\max}$ .

С другой стороны, согласно [4] для всех значений частоты выходного напряжения ПЧ обеспечивает примерно одинаковое значение максимального момента  $M_{\max}$ , т.е. критического момента. Для конкретного АД значения момента  $M_{\max}$  и коэффициента  $K_{\max}$  являются известными.

Используем выражение

$$\gamma_H = 1 - \frac{1 - K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{f_{H6}}{f_H}$$

и, подставив в него вместо коэффициента  $K_{\min}$  и отношения  $\omega_0 / \omega_H$  вышеприведенные выражения, получим искомое выражение:

$$K_{\Pi} \approx 1 + \frac{1 - \frac{f_H}{f_{H6}}}{\frac{f_{H6}}{f_H} \frac{n_{0H}}{n_H} - 1} K_{\max}.$$

Мощность АД  $P = M\omega(M)$ , номинальная мощность  $P_H = M_H \omega_H$ , решив уравнение  $dP/dM = 0$ , получим:

$$M = M' = K_{\Pi} M_{\text{H}} / 2; \quad \omega = \omega(M') = \frac{K_{\Pi} \omega_{\text{H}}}{2(K_{\Pi} - 1)};$$

$$P(M') = P_{\text{max}} = \frac{K_{\Pi}^2}{4(K_{\Pi} - 1)} P_{\text{H}},$$

где  $P_{\text{max}}$  — максимальное значение мощности.

Двигатели с мягкой механической характеристикой (рис. 2) могут быть использованы в приводе электрического транспорта и подъемных устройств и реализованы с помощью ПЧ, ШИМ и ДТ.

Для преобразования жесткой механической характеристики реальных АД в мягкую должны быть известны значения  $f_{\text{H}}/f_{\text{Hб}}$ ,  $n_{\text{H}}$  и  $K_{\text{max}}$ . Неизвестные значения нужно определять так, как указано выше.

Рассчитаем значения характеристик АД для следующих условий:  $\frac{f_{\text{H}}}{f_{\text{Hб}}} = \frac{2}{3}$ ;  $n_{\text{H}} = 1440$  об/мин;  $K_{\text{max}} = 2$ .

Используя приведенные формулы, получаем:

$$n_{0\text{H}} = 1500 \text{ об/мин}; \quad s_{\text{H}} = 0,04; \quad \frac{\omega_0}{\omega_{\text{H}}} = \frac{1}{g} = 1,5625;$$

$$g = 0,64; \quad d = 0,0267; \quad K_{\Pi} = 2,2.$$

По формуле, содержащей значения  $K_{\Pi}$  и  $\omega_0/\omega_{\text{H}}$ , получим  $K_{\text{min}} = 0,325$ , а по формуле, содержащей  $g$ ,  $d$  и  $K_{\text{max}} - K_{\text{min}} = 0,333$ ;  $v = 0,1625$ ;  $\gamma_{\text{H}} = 0,667$ ;

$$\omega \approx \left( 2,2 - \frac{M}{M_{\text{H}}} \right) \omega_{\text{H}} / 1,2; \quad \omega(0,5 M_{\text{H}}) = 1,417;$$

$$\begin{aligned} \omega(1,5 M_{\text{H}}) &= 0,583 \omega_{\text{H}}; \quad P(0,5 M_{\text{H}}) = 0,709 P_{\text{H}}; \\ P(1,5 M_{\text{H}}) &= 0,875 P_{\text{H}}; \quad M' = 1,1 M_{\text{H}}; \quad \omega(M') = 0,917 \omega_{\text{H}}; \\ P_{\text{max}} &= 1,008 P_{\text{H}}. \end{aligned}$$

Согласно результатам расчетов для указанных условий при увеличении момента нагрузки от 0,5 до 1,5 номинального значения частота вращения вала двигателя уменьшается в 2,431 раз, а мощность изменяется в 1,422 раз. У ДПТ с последовательным возбуждением [2] частота вращения вала, примерно пропорциональная  $1/\sqrt{M}$ , и мощность, примерно пропорциональная  $\sqrt{M}$ , изменяются в 1,732 раза ( $\sqrt{1,5}/\sqrt{0,5} = \sqrt{3} = 1,732$ ).

Рассмотренный в статье асинхронный двигатель с мягкой механической характеристикой обеспечивает меньшее изменение мощности при изменении момента нагрузки от 0,5 до 1,5 номинального значения момента, чем двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вольдек А.И.** Электрические машины. Л.: Энергия, 1974, 840 с.
2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. М.: Энергия, 1980, 928 с.
3. **Копылов И.П.** Электрические машины. М.: Высшая школа, Логос, 2000, 607 с.
4. **Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е.** Электрические машины. Асинхронные машины. М.: Альянс, 2017, 328 с.

[28.03.2019]

*А в т о р:* **Гридин Владимир Михайлович** кандидат техн. наук, доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, диссертацию защитил в 1979 г.

*Electrichestvo*, 2019, No. 11, pp. 54–57

DOI:10.24160/0013-5380-2019-11-54-57

## Transforming the Mechanical Characteristic of Induction Motors

**GRIDIN Vladimir M.** (Moscow State Technical University named N.E. Bauman, Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article considers a method for transforming the rigid mechanical characteristic into a soft one for induction motors additionally fitted with a frequency converter, pulse-width modulator (PWM), and current sensor. In the PWM, the sensor output voltage proportional to the difference between the consumed current and no-load current is compared with the value of periodic sawtooth voltage to produce voltage impulses, which are supplied to the converter input. As the shaft torque and, accordingly, the consumed current increase, the mean voltage at the converter input, the motor power supply voltage, its frequency, and the shaft rotation frequency decrease. Joint operation of the PWM and current sensor is described, and requirements for their voltages are formulated. An expression for the transformed mechanical characteristic is obtained. An example of transforming the mechanical characteristic of an induction motor is given, and the characteristics of such motor are calculated. In comparison with a series-excited DC motor, the considered motor shows a smaller change of power in changing the load torque from 0.5 to 1.5 of its nominal value.

**Key words:** asynchronous motor, soft mechanical characteristic, method of transformation, modulator, sensor of current, transformer of frequency

#### REFERENCES

1. **Vol'dek A.I.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Leningrad, Energiya, 1974, 840 p.
2. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Energiya, 1980, 928 p.

3. **Kopylov I.P.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Vysshaya shkola, Logos, 2000, 607 p.

4. **Radin V.I., Bruskin D.E., Zorokhovich A.Ye.** *Elektricheskiye mashiny. Asinkhronnyye mashiny* (Electrical machines. Asynchronous Machines). Moscow, Al'yans, 2017, 328 p.

[28.03.2019]