

УДК 621.314.262:621.313.333

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПРИ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ

М.А. Прищепов,

профессор каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

Е.М. Прищепова,

доцент каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук

В.А. Дайнеко,

доцент каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

И.В. Протосовицкий,

декан агроэнергетического факультета БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье приведены математические выражения механических и электромеханических характеристик асинхронных двигателей и алгоритм расчета предельных механических и электромеханических характеристик в системе электропривода преобразователь частоты – асинхронный двигатель при векторном управлении.

Ключевые слова: электропривод, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, механическая характеристика, электромеханическая характеристика, частотное регулирование, векторное управление.

The article presents mathematical expressions of mechanical and electromechanical characteristics of asynchronous motors and an algorithm for calculating the limiting mechanical and electromechanical characteristics in the electric drive of a frequency converter – asynchronous motor with vector control.

Key words: electric drive, frequency converter, asynchronous motor, mechanical characteristics, electromechanical characteristics, frequency control, vector control.

Введение

Если к частотно-регулируемому асинхронному электроприводу (ЭП) предъявляются жесткие требования в отношении диапазона регулирования (т.е. требуется диапазон регулирования скорости свыше 10 о.е.) и точности регулирования скорости, то в нем используется векторное управление [1-6].

При векторном управлении стабилизация магнитного потока возбуждения асинхронного двигателя (АД) в первой зоне, т.е. при частоте напряжения питания статора f_1 ниже номинальной f_n ($f_1 \leq f_n$), осуществляется в большинстве случаев при постоянстве вектора потокосцепления ротора, ориентированного по оси d Ψ_{2d} и равного номинальному Ψ_{2n} ($\Psi_{2d} = \Psi_{2n} = \text{const}$).

Это обусловлено тем, что системы управления ЭП в синхронно вращающейся системе координат d, g осью d , ориентированной по вектору потокосцепления ротора $\bar{\Psi}_2$, где значения и положения векторов потокосцепления и скорости ротора АД вычисляются по более простым эталонным математическим моделям и являются более простыми по структуре, чем

системы управления с измерением значений и положений векторов потокосцепления, скорости и положения ротора. Несмотря на необходимость вычислений и построения алгоритмов управления ЭП, такие системы проще в технической реализации, а, соответственно, более надежны и получили широкое распространение, хотя и имеют более низкие показатели качества управления, по сравнению с системами с прямым измерением значений и положений векторов переменных АД.

Во второй зоне, т.е. при частоте напряжения питания статора f_1 выше номинальной f_n ($f_1 > f_n$), магнитный поток возбуждения АД Ψ_{2d} будет ослабляться в соответствии с зависимостью:

$$\Psi_{2d} = \Psi_{2n} \frac{\omega}{\omega_{\text{нач}}}, \quad (1)$$

где ω , $\omega_{\text{нач}}$ – текущая и начальная скорость ослабления магнитного потока возбуждения АД, с^{-1} .

В отличие от скалярного частотного управления, где из-за сложности электромагнитных процессов, протекающих в АД, магнитный поток возбуждения двигателя Ψ_2 в переходном процессе не остается по-

стоянным, что приводит к колебаниям его электромагнитного момента M и скорости ω , при векторном управлении магнитный поток Φ_2 и электромагнитный момент M АД возможно поддерживать точно на заданном уровне, что, соответственно, обеспечивает максимальное быстродействие двигателя без колебаний скорости ω . Эта особенность векторного управления АД требует расчета предельных механических и электромеханических характеристик разомкнутой системы ЭП преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД).

Целью данной работы является определение расчетным путем предельных границ областей длительно и кратковременно допустимых нагрузок в системе ЭП ПЧ-АД при векторном управлении.

Основная часть

Выражение для расчета механической характеристики имеет следующий вид [7, 8]:

$$M = \frac{3U_n r_2'}{\omega_0 s \left((x_k)^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2 \right)}, \quad (2)$$

где U_n – фазное номинальное напряжение питания обмоток статора АД, В;

r_1 – активное сопротивление обмоток статора, Ом;

r_2' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

x_μ – индуктивное сопротивление контура намагничивания АД, Ом;

$x_k = x_1 + x_2'$ – индуктивное сопротивление обмоток для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе), Ом;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки фазы статора АД, Ом;

x_2' – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

s – скольжение АД, о.е.;

ω_0 – синхронная угловая скорость вращения магнитного поля статора, c^{-1} .

Выражения для расчета электромеханической характеристики и его составляющие

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0 I_2' \sin \varphi_2}, \quad (3)$$

где I_1 – действующее значение фазного тока обмоток статора АД, А;

I_2' – приведенный к обмотке статора ток ротора, А:

$$I_2' = \frac{U_n}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2}}; \quad (4)$$

I_0 – ток холостого тока АД, А:

$$I_0 = \frac{U_n}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}}; \quad (5)$$

$\sin \varphi_2$ – синус угла между вектором фазного номинального напряжения U_n и сопряженным вектором тока ротора – I_2' :

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_k}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2}}. \quad (6)$$

По результатам расчета строится механическая $\omega=f(M)$ (рис. 1а) и электромеханическая $\omega=f(I)$ (рис. 1б) характеристики, где $\omega = \omega_0 (1-s)$.

Далее, как и при скалярном управлении, аналогично, как и в работах [4; 8], проводится определение области работы ЭП:

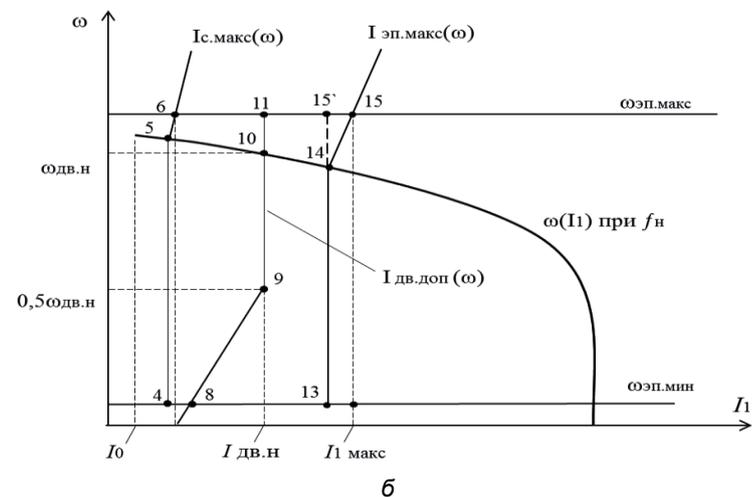
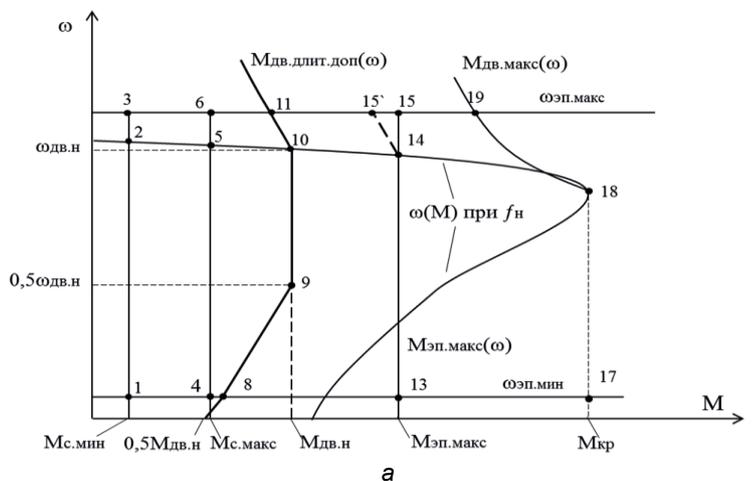


Рисунок 1. Характеристики разомкнутой системы электропривода ПЧ-АД при векторном управлении: а – механические характеристики; б – электромеханические характеристики

1. На полученной механической характеристике $\omega=f(M)$ (рис. 1а) наносятся верхняя и нижняя граничные характеристики нагрузки для длительного

$M_{с.мин}(\omega)$, $M_{с.макс}(\omega)$ и кратковременного $M_{эп.макс}(\omega)$ режимов работы:

- $M_{с.мин}(\omega) = \text{const}$ (т. 1-3);
- $M_{с.макс}(\omega) = \text{const}$ (т. 4-6);
- $M_{эп.макс}(\omega) = \text{const}$ (т. 13-15).

2. Рассчитывается и строится зависимость длительно допустимого момента электродвигателя $M_{дв.длит.доп}(\omega)$ (рис. 1а, т. 8-11):

– в зоне работы с номинальным потоком ($f_1 \leq f_n$):

$$M_{дв.длит.доп}(\omega) = M_n \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_n}\right) \text{ при } \omega \leq 0,5\omega_n, \quad (7)$$

$$M_{дв.длит.доп}(\omega) = M_n \text{ при } 0,5\omega_n < \omega \leq \omega_n; \quad (8)$$

– в зоне работы с ослабленным потоком ($f_1 > f_n$):

$$M_{дв.длит.доп}(\omega) = M_n \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right) \text{ при } \omega > \omega_n. \quad (9)$$

3. Рассчитывается и строится зависимость максимального допустимого момента $M_{дв.макс}(\omega)$ (рис. 1а, т. 17-19):

– в зоне работы с номинальным потоком ($f_1 \leq f_n$)

и $\omega = \omega_0(1 - s_k)$:

$$M_{дв.макс}(\omega) = M_{кр} = 3U_n^2 \times \left[2\omega_0 \left(r_1 + \sqrt{\left(r_1^2 + x_k^2 \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{r_1'}{x_\mu} \right)^2 \right)} \right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

$$s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad (11)$$

где $M_{кр}$, s_k – критические момент (Н·м) и скольжение (о.е.), АД;

– в зоне работы с ослабленным потоком ($f_1 > f_n$) и $\omega > \omega_0(1 - s_k)$:

$$M_{дв.макс}(\omega) = M_{кр} \left(\frac{\omega_0(1 - s_k)}{\omega} \right)^2. \quad (12)$$

4. На электромеханических характеристиках $\omega=f(I_1)$ (рис. 1б) рассчитываются и наносятся графические характеристики для длительно допустимого тока АД $I_{дв.длит.доп}(\omega)$ (т. 8-11):

– в зоне работы с номинальным потоком ($f_1 \leq f_n$):

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{дв.н} \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_n}\right) \text{ при } \omega \leq 0,5\omega_n,$$

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{дв.н} \text{ при } 0,5\omega_n < \omega \leq \omega_n;$$

– в зоне работы с ослабленным потоком ($f_1 > f_n$)

при условии полного использования АД по тепловому режиму

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{дв.н} \text{ при } \omega > \omega_n.$$

5. Далее рассчитывается и наносится на электромеханические характеристики $\omega=f(I_1)$ зависимость $I_{с.макс}(\omega)$, соответствующая длительной максимальной нагрузке $M_{с.макс}(\omega)=\text{const}$ (рис. 1б, т. 4-6). Для этого необходимо на естественной характеристике $M(\omega)$ определить соответствующее $M_{с.макс}$ значение скольжения в точке 5, решив относительно скольжения s уравнение (2), т.е.

$$M_{с.макс} = \frac{3U_n^2 r_2'}{\omega_0 s \left(x_k^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2 \right)}. \quad (13)$$

После преобразований получим формулу для вычисления скольжения s

$$s = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (14)$$

где коэффициенты полученного квадратного уравнения вычисляются по следующим формулам:

$$a = \left(x_k^2 + r_1^2 \right); \quad (15)$$

$$b = \left(2r_1 r_2' - \frac{3U_n^2 r_2'}{\omega_0 M_{с.макс}} \right); \quad (16)$$

$$c = \left(r_2'^2 + \frac{r_1^2 r_2'^2}{x_\mu^2} \right). \quad (17)$$

Далее, вычислив скольжение s , по выражению (3) рассчитывается значение тока $I_{1,т.5}$ и соответствующее значение скорости $\omega_{т.5} = \omega_0(1 - s)$, при этом I_2' , I_0 и $\sin\varphi_2$ вычисляются по формулам (4-6).

Зависимость $I_{с.макс}(\omega)$ рассчитывается по выражениям:

$$I_{с.макс}(\omega) = I_{1,т.5} \text{ при } \omega \leq \omega_{т.5} \text{ (т.5-4);} \quad (18)$$

$$I_{с.макс}(\omega) = I_{1,т.5} \cdot \frac{\omega}{\omega_{т.5}} \text{ при } \omega > \omega_{т.5} \text{ (т. 6).}$$

6. Для нанесения на электромеханические характеристики $\omega=f(I_1)$ зависимости $I_{эп.макс}(\omega)$, соответствующей кратковременной максимальной нагрузке $M_{эп.макс}(\omega)=\text{const}$, необходимо, аналогично, как и при построении зависимости $I_{с.макс}(\omega)$, на естественной механической характеристике $M(\omega)$ определить соответствующее $M_{эп.макс}$ значение скольжения s , скорости ω и тока I_1 в точке 14, по соответствующим выражениям. Тогда зависимость $I_{эп.макс}(\omega)$ рассчитывается по следующим выражениям:

$$I_{эп.макс}(\omega) = I_{1,т.14} \text{ при } \omega \leq \omega_{т.14} \text{ (т.13-14);} \quad (19)$$

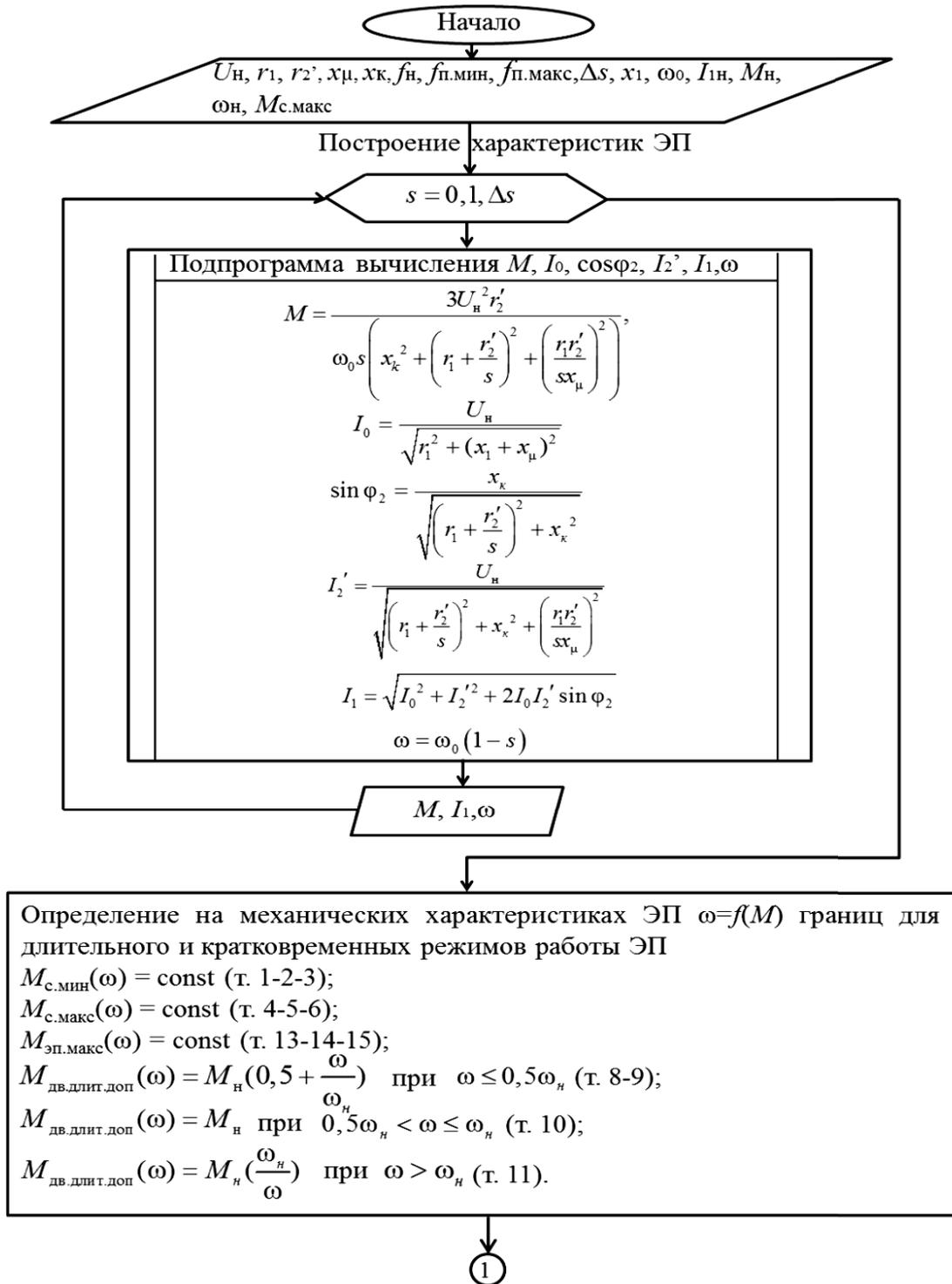
$$I_{эп.макс}(\omega) = I_{1,т.14} \cdot \frac{\omega}{\omega_{т.14}} \text{ при } \omega > \omega_{т.14} \text{ (т.15).}$$

Полученные зависимости для $M_{эп.макс}(\omega)=\text{const}$ (рис. 1а, т. 13-15) и $I_{эп.макс}(\omega)$ (рис. 1б, т. 13-15) показывают, что АД выбран с большим запасом по мощности при

кратковременной перегрузке, так как $M_{т.15}$ значительно меньше $M_{т.19}$. Однако в двузонном ЭП наиболее просто и целесообразно применять независимое управление потокоцеплением с постоянным токоограничением в обеих зонах $I_{эп.макс} = \text{const}$ (рис. 1б, т. 13-15'), тогда характеристика $M_{эп.макс}(\omega)$ на участке т. 14-15' (рис. 1а) рассчитывается по выражению:

$$M_{эп.макс}(\omega) = M_{эп.макс} \cdot \frac{\omega_{т.14}}{\omega} \text{ при } \omega > \omega_{т.14} \text{ (т.15')}. \quad (20)$$

Блок-схема алгоритма изложенной методики расчета и построения характеристик разомкнутой системы ЭП ПЧ-АД при векторном управлении представлена на рисунке 2.



①

Расчет и построение зависимости максимального допустимого момента

$M_{дв.макс}(\omega)$

$$M_{кр} = \frac{3U_n^2}{2\omega_0 \left(r_1 + \sqrt{(r_1^2 + x_k^2) \cdot \left(1 + \left(\frac{r_1'}{x_\mu} \right)^2 \right)} \right)}, \quad s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}};$$

$$\omega = \omega_0(1 - s_k)$$

$$M_{дв.макс}(\omega) = M_{кр} \quad \text{при} \quad \omega \leq \omega_k \quad (\text{т.17-18});$$

$$M_{дв.макс}(\omega) = M_{кр} \left(\frac{\omega_0(1 - s_k)}{\omega} \right)^2 \quad \text{при} \quad \omega > \omega_k \quad (\text{т.19});$$

↓

Определение на электро механических характеристиках ЭП $\omega=f(I)$ границ длительно допустимого тока двигателя от скорости $I_{дв.длит.доп}(\omega)$

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_n \left(0,5 \cdot \frac{\omega}{\omega_n} \right) \quad \text{при} \quad \omega \leq 0,5\omega_n \quad (\text{т. 8-9});$$

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_n \quad \text{при} \quad 0,5\omega_n < \omega \leq \omega_n \quad (\text{т. 10});$$

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_n \quad \text{при} \quad \omega > \omega_n \quad (\text{т. 11}).$$

↓

Расчёт и построение зависимости $I_{с.макс}(\omega)$, соответствующей длительной максимальной нагрузке $M_{с.макс}(\omega)$.

$$a = (x_k^2 + r_1^2); \quad b = \left(2r_1r_2' - \frac{3U_n^2r_2'}{\omega_0 M_{с.макс}} \right);$$

$$c = \left(r_2'^2 + \frac{r_1^2r_2'^2}{x_\mu^2} \right); \quad s = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a};$$

$$I_0 = \frac{U_n}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{x_k}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2}};$$

$$I_2' = \frac{U_n}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2 + \left(\frac{r_1r_2'}{sx_\mu} \right)^2}}; \quad I_{1т.5} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0I_2' \sin \varphi_2};$$

$$\omega_{т.5} = \omega_0(1 - s);$$

$$I_{с.макс}(\omega) = I_{1т.5} \quad \text{при} \quad \omega \leq \omega_{т.5} \quad (\text{т. 5-4});$$

$$I_{с.макс}(\omega) = I_{1т.5} \cdot \frac{\omega}{\omega_{т.5}} \quad \text{при} \quad \omega > \omega_{т.5} \quad (\text{т. 6}).$$

②

2

Расчёт и построение зависимости $I_{\text{эп.макс}}(\omega)$, соответствующей кратковременной максимальной нагрузке $M_{\text{эп.макс}}(\omega)$.

$$a = (x_k^2 + r_1^2); \quad b = \left(2r_1r_2' - \frac{3U_H^2 r_2'}{\omega_0 M_{\text{эп.макс}}} \right);$$

$$c = \left(r_2'^2 + \frac{r_1^2 r_2'^2}{x_\mu^2} \right); \quad s = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a};$$

$$I_0 = \frac{U_H}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_\mu)^2}}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{x_k}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2}};$$

$$I_2' = \frac{U_H}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2}}; \quad I_{1.т.14} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0 I_2' \sin \varphi_2};$$

$$\omega_{т.14} = \omega_0 (1 - s);$$

$$I_{\text{эп.макс}}(\omega) = I_{1.т.14} \quad \text{при} \quad \omega \leq \omega_{т.14} \quad (\text{т. 14-13});$$

$$I_{\text{эп.макс}}(\omega) = I_{1.т.14} \cdot \frac{\omega}{\omega_{т.14}} \quad \text{при} \quad \omega > \omega_{т.14} \quad (\text{т. 15});$$

$$M_{\text{эп.макс}}(\omega) = M_{\text{эп.макс}} \frac{\omega_{т.14}}{\omega} \quad \text{при} \quad \omega > \omega_{т.14} \quad (\text{т.15}').$$

Конец

Рисунок 2. Блок-схема алгоритма расчета механических и электромеханических характеристик системы электропривода ПЧ-АД при векторном управлении

Заключение

Проведенный анализ полученных предельных механических и электромеханических характеристик показывает, что система ЭП ПЧ-АД с векторным управлением обладает более стабильными характеристиками в сравнении с аналогичной системой ЭП со

скалярным управлением, и ее анализ требует меньшего количества вычислений и построений.

Для обеспечения широкого диапазона регулирования скорости ЭП необходимо использовать двузонное регулирование скорости, при постоянном и ослабленном потоке возбуждения. При этом в двузонном ЭП с независимым управлением потокосцеп-

ления $\psi_2(\omega)$ целесообразно использовать постоянное токоограничение в обеих зонах $I_{\text{эл.макс}} = \text{const}$. В системах двузонного ЭП с зависимым управлением потокосцеплением $\psi_2(\omega)$ принципиально возможна реализация зависимого токоограничения $I_{\text{эл.макс}}(\omega)$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чиликин, М.Г. Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974 – 568 с.
2. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
3. Фираго, Б.И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
4. Мальцева, О.П. Системы управления электроприводов: учеб. пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удуг, Н.В. Кояин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.

5. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.

6. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

7. Прищепов, М.А. Расчет статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частотном регулировании скорости и стабилизации потока возбуждения статора / М.А. Прищепов, Д.И. Иванов, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2016. – № 6 (118). – С. 20-30.

8. Прищепов, М.А. Расчет предельных механических и электромеханических характеристик при частотном регулировании скорости в разомкнутой системе преобразователь частоты-асинхронный двигатель / М.А. Прищепов, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2021. – № 5 (147). – С. 15-27.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 23.03.2022

УДК 633.43

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДНОЙ СЕКЦИИ ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА БИОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЯЧМЕНЯ

О.В. Бондарчук,

ст. преподаватель каф. электротехнологии БГАТУ

И.В. Протосовицкий,

декан агроэнергетического факультета БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье изложена методика расчета электродной секции электроактиватора биологической системы ячменя, которая позволяет определить ее геометрические параметры и потребляемую мощность.

Ключевые слова: напряженность, напряжение, электрическое поле, электроактиватор, электродная секция, конструкция, пивоваренный ячмень, солод.

A method for calculating the electrode section of the electric activator of the biological system of barley is presented in the article. It allows determining its geometric parameters and powering consumption.

Key words: tension, voltage, electric field, electric activator, electrode section, design, malting barley, malt.

Введение

В Республике Беларусь ежегодно производится более 135 тысяч тонн солода [1]. Основным сырьем для его производства служит пивоваренный ячмень [2]. Солод определяет качество и количество конечного продукта производства – пива.

Повысить качество солода можно обработкой пивоваренного ячменя химическими, биологическими и физическими способами. Среди наиболее перспективных и экологически чистых выделяют электрофизические. До настоящего времени разработка конструкции устройств, реализующих

указанные способы, выполнялась, в основном, с целью предпосевной обработки семян [3-7]. В частности, было предложено устройство стимулятора всхожести [8], представляющее собой бифилярную обмотку. Недостатком данной конструкции является недоиспользование полезной площади проводников, так как только одна половина обмотки задействована в создании напряженности в рабочей зоне.

В настоящей работе предложена конструкция электродной секции электроактиватора, используемого в производстве солода из пивоваренного ячменя. Секция выполнена из проводников, параллельно уложенных на диэлектрическое основание, что