С. Ю. Еремочкин

В статье рассмотрен вопрос построения механической характеристики трехфазного асинхронного электропривода с векторно-алгоритмическим управлением. Приведены векторная диаграмма кругового вращающегося поля статора электродвигателя, а также механическая характеристика трехфазного асинхронного электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети посредством однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора.

Ключевые слова: трехфазный асинхронный электродвигатель, векторноалгоритмическое управление, электропривод.

Сельское хозяйство является одной из важнейших отраслей экономики России. В развитии сельского хозяйства все большую роль играют фермерские хозяйства и индивидуальные хозяйства населения. Большинство индивидуальных хозяйств населения находится в отдаленной сельской местности, в которой электроснабжение отдельных потребителей осуществляется от однофазной сети переменного тока. Одними из основных потребителей электроэнергии в сельском хозяйстве в настоящее время являются асинхронные электроприводы различных машин и механизмов, а также систем вентиляции и микроклимата [1]. На основании проведенного анализа [2] установлено, что в электроприводе сельскохозяйственных электрифицированных машин предпочтительнее использовать трехфазные асинхронные короткозамкнутые двигатели.

При непосредственном питании от однофазной сети переменного тока для запуска и работы трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя целесообразно использовать разработанный однофазнотрехфазный транзисторный реверсивный коммутатор, ведомый однофазной сетью [3]. Принципиальная электрическая схема однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью, показана на рисунке 1.

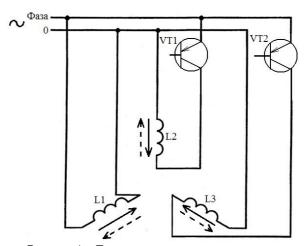


Рисунок 1 — Принципиальная электрическая схема однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью

На рисунке 1 используются следующие обозначения:

- L1, L2, L3 статорные обмотки трехфазного электродвигателя;
 - IL1, IL2, IL3 ток в статорных обмотках;
 - VT1, VT2 биполярные транзисторы;
- сплошные и пунктирные линии со стрелками вдоль обмоток статора двигателя соответственно, прямое и обратное направление тока.

Векторно-алгоритмическое управление однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью, осуществляется следующим обра-

зом. В статорные обмотки трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя подается однофазное переменное напряжение (рисунок 2) посредством коммутации соответствующих транзисторов, обеспечивающих получение вращающегося магнитного поля статора (рисунок 3).

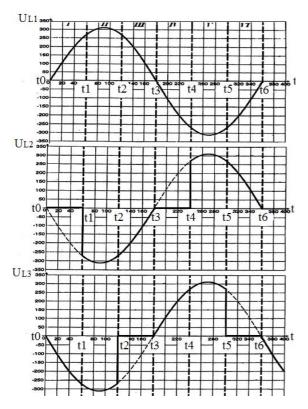


Рисунок 2 — Осциллограммы напряжений статорных обмоток электродвигателя

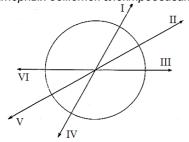


Рисунок 3 — Векторная диаграмма вращающегося поля статора электродвигателя

Кроме того, в работе однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью, используется свойство транзисторов пропускать ток в ключевом режиме в прямом и обратном направлениях вследствие симметричной структуры.

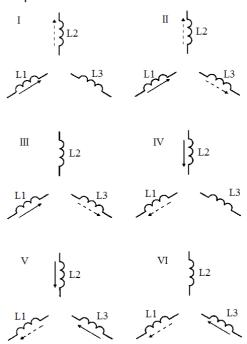


Рисунок 4 — Направления магнитного потока и протекающего тока по обмоткам статора электродвигателя в соответствии с векторной диаграммой, изображенной на рисунке 5

Для обеспечения вращения вектора магнитного потока вращающегося поля статора двигателя в соответствии с векторной диаграммой, показанной на рисунке 3, в последовательности I-II-III-IV-V-VI, необходимо подавать управляющее напряжение на базы транзисторов VT1 и VT2 в следующей последовательности. В начальный момент времени t0 (рисунок 2) подается отпирающее управляющее напряжение на базу транзистора VT1. Ток протекает по обмотке L1 в прямом направлении, по обмотке L2 - в обратном направлении (рисунок 4): обеспечивается получение I фиксированного положения вектора магнитного потока поля статора. В момент времени t1 (рисунок 2) подается отпирающее управляющее напряжение на базу транзистора VT2, транзистор VT1 остается открытым. Ток протекает по обмотке L1 в прямом направлении, по обмоткам L2 и L3 - в обратном направлении: обеспечивается получение II фиксированного положения вектора магнитного потока поля статора. В момент времени t2 снимается отпирающее управляющее напряжение с базы транзистора VT1, транзистор VT2 остается открытым. Ток протекает по обмотке L1 в прямом направлении, по обмотке L3 - в обратном направлении: обеспечивается получение III фиксированного положения вектора магнитного потока поля статора. В момент времени t3 снимается отпи-

рающее управляющее напряжение с базы транзистора VT2 и подается на базу транзистора VT1. Ток протекает по обмотке L1 в обратном направлении, по обмотке L2 - в прямом направлении: обеспечивается получение IV фиксированного положения вектора магнитного потока поля статора. В момент времени t4 подается отпирающее управляющее напряжение на базу транзистора VT2, транзистор VT1 остается открытым. Ток протекает по обмотке L1 в обратном направлении, по обмоткам L2 и L3 – в прямом направлении: обеспечивается получение V фиксированного положения вектора магнитного потока поля статора. В момент времени t5 снимается отпирающее управляющее напряжение с базы транзистора VT1, транзистор VT2 остается открытым. Ток протекает по обмотке L1 в обратном направлении, по обмотке L3 - в прямом направлении: обеспечивается получение VI фиксированного положения вектора магнитного потока поля статора. Далее алгоритм работы аналогичным образом повторяется.

Для оценки эффективности разработанного однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора построим его механическую характеристику и сравним с естественной при питании от трехфазной сети. Как известно [4], расчет и построение механической характеристики трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя при симметричном питании производят с учетом каталожных данных двигателя по формуле Клосса:

$$M_{_{9M}} = \frac{2M_{_{Kp}}}{\frac{s}{s_{_{Kp}}} + \frac{s_{_{Kp}}}{s}}, \qquad (1)$$

где $M_{_{\rm 9M}}$ — электромагнитный момент электродвигателя;

 $\mathsf{M}_{\mbox{\tiny KP}}$ – критический момент электродвигателя;

s – скольжение электродвигателя;

 $\boldsymbol{s}_{_{\boldsymbol{k}\boldsymbol{p}}}$ – критическое скольжение электродвигателя.

При несимметричном питании статорных обмоток электродвигателя (при векторно-алгоритмическом управлении с использование однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатор (рисунок 1)), работу асинхронного электродвигателя лучше всего представить, разложив несимметричную систему напряжений на статорных обмотках на две симметричные системы — прямую и обратную [5]. Каждая составляющая напряжений обеспечивает возникновение своего мо-

мента (M_{np} и M_{obp}). Результирующий электромагнитный момент асинхронного двигателя равен алгебраической сумме:

$$M = M_{np} + M_{o6p}. (2)$$

Определение составляющих прямой и обратной последовательностей напряжений производится следующим образом. В соответствии с алгоритмом подачи напряжений на статорные обмотки электродвигателя (рисунок 2) по формуле $U = Um \cdot sin \cdot \omega t$, строятся осциллограммы напряжений для каждой из статорных обмоток. Затем на каждом из участков тактирования Кј промежутка коммутации Z, для каждой из статорных обмоток находится среднее значение напряжения с учетом направления протекающего по ней тока: либо $+ Um \cdot sin \cdot \omega t_i$, либо $- Um \cdot sin \cdot \omega t_i$, либо $U_{\text{обм}}$ =0 (обмотка не работает). Для промежутка коммутации Z_1 , обмотки A, например, среднее значение напряжения находится по формуле:

$$U_{Cp,Z_1A} = U_{K_1Z_1A} + U_{K_2Z_1A} + ... + U_{K_iZ_1A}$$
, (3)

где $\,{\rm U}_{Cp,Z_1\!A}\,$ – среднее значение напряжения в обмотке A на промежутке коммутации $\,Z_{_1};$

 $U_{K_{j}Z_{l}A}\,$ – напряжение в обмотке A на j участке тактирования.

Аналогичным образом среднее значение напряжения в каждом из промежутков коммутации находится для двух других статорных обмоток.

Далее в каждом из промежутков коммутации производится векторное сложение полученных значений напряжений по теореме косинусов, для обмок A и B, например, формула будет иметь вид:

. .
$$U_a + U_b = \sqrt{U_a + U_b + 2 U_a U_b \cos \alpha}$$
, (4)

где $\,{\rm U}_a\,$ и $\,{\rm U}_b\,$ – вектора напряжения статорных обмоток A и B соответственно.

Если напряжение на одной из обмоток, $U_{\text{обм}}$ =0, то угол между двумя другими векторами будет либо α = 120° при одинаковом направлении токов в обмотках (положительном или отрицательном), либо α = 60° при разном направлении токов в обмотках.

Если напряжение есть на всех трех обмотках, то сначала суммируются по теореме косинусов вектора напряжений, взятые по

модулю, двух обмоток с положительным или с отрицательным направлением тока, причем угол между данными векторами составляет $\alpha=120^\circ$. Затем к полученному значению прибавляется напряжение на третьей обмотке, взятое также по модулю. Таким образом, получают суммарное значение вектора напряжения статорных обмоток в каждый из промежутков коммутации $\sum U_{z, ABC}$:

$$\sum_{i} U_{Z_{1}ABC} = U_{Cp,Z_{1}A} + U_{Cp,Z_{1}B} + U_{Cp,Z_{1}C}, \quad (5)$$

где $U_{Cp,Z_1A}, U_{Cp,Z_1B}, U_{Cp,Z_1C}$ – среднее значение вектора напряжения статорных обмоток A, B и C соответственно, в промежутке коммутации Z_1 .

На основании полученных суммарных значений вектора напряжения статорных обмоток в каждом из промежутков коммутации Z_L строится векторная диаграмма вращающегося поля статора, причем для нахождения второго вектора F_2 строится окружность с центром (O) и радиусом $R=F_1$ (рисунок 5) [6].

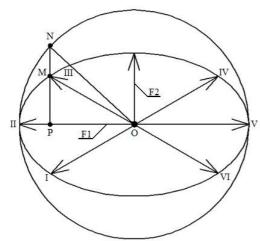


Рисунок 5 — Векторная диаграмма вращающегося поля статора, поясняющая нахождение вектора F₂

Из точки пересечения эллипса и III вектора электромагнитного поля, проводится перпендикуляр к второму вектору II магнитного поля статора. Точка Р – точка пересечения перпендикуляра с вторым вектором II магнитного поля статора. Линия МР продолжается до пересечения с окружностью с центром в точке О и радиусом R=F₁. Точка пересечения линии МР и окружности – точка N. Проводится отрезок NO, равный радиусу окружности. В прямоугольном треугольнике МРО сторона МО – гипотенуза, катет МР лежит напротив

угла, равного 30°, следовательно, катет MP равен половине гипотенузы:

$$MP = \frac{MO}{2} . {(6)}$$

В прямоугольном треугольнике МРО сторона РО находится по теореме Пифагора:

$$OP = \sqrt{MO^2 - MP^2} . ag{7}$$

По теореме Пифагора в прямоугольном треугольнике PON:

$$OP^2 + PN^2 = NO^2$$
. (8)

$$PN = \sqrt{NO^2 - OP^2} . {9}$$

Коэффициент сжатия эллипса к:

$$k = \frac{MP}{PN} = \frac{F_2}{NO} . {10}$$

Из формулы (10) находится значение вектора F_2 :

$$F_2 = \frac{NO \cdot MP}{PN} . \tag{11}$$

На рисунке 6 представлена диаграмма эллиптического вращающегося поля статора, рассчитанная для трехфазного двигателя, питающегося по схеме, показанной на рисунке 1.

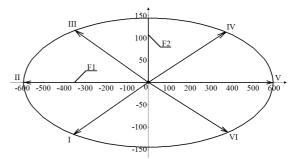


Рисунок 6 – Векторная диаграмма вращающегося поля статора

По векторной диаграмме находятся значения составляющих прямой и обратной последовательностей напряжений U_{np} и $U_{oбp}$ следующим образом. Известно, что $U_{np} + U_{oбp}$ является вектором F_1 , имеющим большую величину. Для векторной диаграммы, представленной на рисунке 6, вектор F_1 равен:

$$F_1 = U_{\Pi p} + U_{000p}$$
. (12)

Вектор Г, равен:

$$F_2 = U_{\pi p} - U_{o \delta p}$$
 (13)

Из уравнений (12) и (13) находятся $U_{\text{обр}}$ и $U_{\text{пл}}.$

Критическое скольжение $s_{_{\mbox{\tiny KP}}}$, как известно, находится по формуле:

$$\label{eq:skp} \boldsymbol{s}_{_{\boldsymbol{K}\boldsymbol{p}}} = \boldsymbol{s}_{_{\boldsymbol{H}}}(\boldsymbol{\lambda} \pm \sqrt{\boldsymbol{\lambda}^2 - 1})\,, \tag{14}$$

где λ — перегрузочная способность двигателя.

Номинальное скольжение $s_{_{\! H}}$ электродвигателя определяется по формуле:

$$S_{H} = \frac{\omega_{0} - \omega_{H}}{\omega_{0}}, \tag{15}$$

где $\omega_{_{\! H}}$ – номинальная скорость электродвигателя.

Значение $s_{_{\! H}}$ подставляется в формулу (14), находится $s_{_{\! K\! D}}$.

Критический момент прямой составляющей $M_{_{\text{кр.пр.}}}$ находится по формуле:

$$M_{\text{kp.np.}} = M_{\text{kp.ect}} \left(\frac{U_{\text{np}}}{U_{\text{u}}} \right)^2, \tag{16}$$

где $U_{_{\rm H}}$ – номинальное напряжение электродвигателя, $U_{_{\rm H}}$ =380 B.

Критический момент $M_{\mbox{\tiny kp.ect}}$ определяется как:

$$M_{\text{\tiny KD, ect}} = \lambda M_{\text{\tiny H}}.$$
 (17)

Причем номинальный момент рассчитывается по формуле:

$$M_{_{H}} = \frac{P_{_{H}}}{\omega_{_{L}}}.$$
 (18)

Критический момент обратной составляющей $\mathbf{M}_{\text{кр.обр.}}$ равен:

$$M_{\kappa p.o6p.} = M_{\kappa p.ect.} \left(\frac{U_{o6p}}{U_{H}} \right)^{2}. \tag{19}$$

Механические характеристики для прямой и обратной составляющих строятся в соответствии с формулой Клосса:

$$M_{np} = \frac{2M_{kp,np.}}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}};$$
 (20)

$$M_{obp} = \frac{2M_{kp.obp.}}{\frac{2-s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{2-s}}.$$
 (21)

Результирующий электромагнитный момент асинхронного двигателя находится по формуле (2).

На основании полученных данных строятся механические характеристики трехфазного электродвигателя (P_H =16 Bt, U_H =220/380 B, I_H =0,17/0,1 A, I_H =1300 об/мин, I_H =1,6) (рисунок 7).

На рисунке 7 используются следующие обозначения:

1 – механическая характеристика обратной составляющей момента при работе элек-

тродвигателя на искусственной характеристике:

- 2 механическая характеристика прямой составляющей момента при работе электродвигателя на искусственной характеристике:
- 3 искусственная механическая характеристика электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети с помощью разработанного однофазнотрехфазного транзисторного реверсивного коммутатора;
- 4 естественная механическая характеристика электродвигателя.

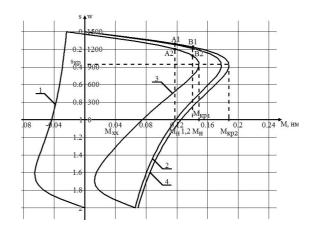


Рисунок 7 – Механические характеристики асинхронного электродвигателя лабораторной установки

Из рисунка 7 видно, что пусковой момент суммарной характеристики равен 0,075 нМ, что составляет примерно 60 % от пускового (0,125)нМ) на естественной момента механической характеристике. Критический момент $M_{\mbox{\tiny Kp1}}$ суммарной характеристики равен 0,1488 нм, что составляет 79 % от критического момента М_{ко2} =0,188 нм естественной характеристики, механической кратность номинальному пускового момента К уменьшается с 1,06 до 0,64, а кратность критического момента по отношению к номинальному уменьшается с 1,6 до 1,27.

Для проверки корректности вышеприведенных вычислений с учетом того, что доминирующее значение напряжения при создании магнитного поля статора имеется на промежутке коммутации t1-t2 (рисунок 2), в котором оно близко к амплитудному значению напряжения и существует на всех трех обмотках, разложим это суммарное напряжение в ряд Фурье [7] (рисунок 8).

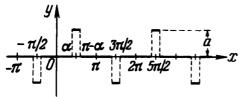


Рисунок 8 – Разложение в ряд Фурье

Функция разложения в ряд Фурье имеет вид:

$$y = U = \frac{4a}{\pi} (\cos \alpha \sin x + \frac{1}{3} \cos 3\alpha \sin 3x + \frac{1}{5} \cos 5\alpha \sin 5x + \frac{1}{7} \cos 7\alpha \sin 7x + ...), \tag{22}$$

где а – суммарное значение вектора напряжения статорных обмоток во втором промежутке коммутации;

 α – 60 градусов;

х - 60 градусов.

Из формулы (16) U = 304,324 (В), что приблизительно равно амплитуде прямой составляющей напряжения, найденной из векторной диаграммы эллиптического вращающегося поля статора (рисунок 5) и свидетельствует о правильности вышеприведенных вычислений.

Таким образом, на основании изложенного, можно сделать выводы о том, что трехфазный асинхронный электродвигатель при данном способе питания от однофазной сети:

- рекомендуется пускать на холостом ходу или с моментом сопротивления $\leq 0.6\,\mathrm{M}_{\mathrm{H}}$, а затем подключать нагрузку; причем при использовании предлагаемой схемы коммутатора, например, в электроприводе вентилятора, включать электродвигатель можно сразу на нагрузку, так как у вентилятора начальный момент нагрузки примерно равен моменту холостого хода M_{xx} и составляет около 30 % от номинального:
- электродвигатель может длительно работать с моментом сопротивления, равным номинальному моменту (точка A2). При этом будет несколько снижена номинальная

скорость (с 1300 до 1200 об/мин), примерно на 7,7 %;

- электродвигатель может даже работать с моментом, равным $1,2\,\mathrm{M}_{_{\! H}}$ (точка B2), и так как критический момент при работе на искусственной характеристике, равен $1,3\,\mathrm{M}_{_{\! H}}$, то электродвигатель не выпадает из асинхронного режима;
- так как скорость вращения при номинальном моменте, незначительно отличается от номинальной (меньше на 7,7 %), то производительность электропривода с таким включением асинхронного электродвигателя падает незначительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Епифанов, А. П. Электропривод в сельском хозяйстве / А. П. Епифанов, А. Г. Гущинский, Л. М. Малайчук. М.: Изд-во «Лань», 2010. 224 с.
- 2. Халина, Т. М. Проблемы энергетики при использовании электрической энергии для электропривода сельскохозяйственных машин в отдаленных фермерских хозяйствах / Т. М. Халина, М. И. Стальная, С. Ю. Еремочкин // НАН Азербайджана, Баку: Изд-во: ЭЛМ. Проблемы энергетики. 2012. № 1. С. 37–44.
- 3. Однофазно-трехфазный транзисторный реверсивный коммутатор, ведомый сетью: пат. 121976 Рос. Федерация. № 2012124138/07; заявл. 08.06.2012 г.; опубл. 10.11.2012 г..
- 4. Ключев, В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 1998. 704 с.
- 5. Ковчин, С. А. Теория электропривода / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. СПб. : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2000. – 496 с.
- 6. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. М. : АСТ: Астрель, 2006. 991 с.
- 7. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1986. – 544 с.
- Еремочкин С. Ю., аспирант, E-mail: S.Eremochkin@ya.ry, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод», +7(385-2)29-08-64.