

Е.Б. Ковалев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ОДНОФАЗНОМ РЕЖИМЕ**

Математическая модель перехода асинхронного двигателя из трехфазного режима в однофазный при питании его от тиристорного регулятора напряжения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронный двигатель, однофазный режим, переходный процесс, регулятор напряжения тиристорный, трехфазный режим.

Математична модель переходу асинхронного двигуна з трифазного режиму в однофазний при живленні його від тиристорного регулятора напруги.

К л ю ч о в і с л о в а: асинхронний двигун, однофазний режим, перехідний процес, регулятор напруги тиристорний, трифазний режим.

Постановка проблемы. Питание асинхронных двигателей (АД) от полупроводниковых преобразователей связано с периодическим, в соответствии с заданным законом, подключением двигателя к различному напряжению. В результате этого обмотка статора АД может быть за время одного периода питающего напряжения подключена к симметричному или несимметричному трехфазному напряжению, отключена от напряжения или замкнута накоротко на зажимах. Отсюда напряжение на зажимах АД может быть синусоидальным или несинусоидальным, симметричным или несимметричным, АД может быть полностью отключен от сети или его зажимы замкнуты.

Если работа АД при несинусоидальном напряжении изучена довольно полно, то его работа в несимметричном режиме изучена весьма слабо. И почти совершенно не изучены переходные процессы из одного режима в другой.

Необходимо отметить, что такие режимы весьма распространены при питании АД от обычной симметричной синусоидальной сети, например, когда пускатель замыкает контакты всех трех полюсов неодновременно [1, с.549]. При частоте $f = 50$ Гц расхождение моментов замыкания в $0,005$ с соответствует четверти периода тока и это запаздывание может существенным образом повлиять на протекание переходного процесса.

Поэтому следует сначала исследовать, что произойдет, если на сеть включаются только обмотки двух фаз статора, например, В и С. Обмотки обеих фаз обтекаются одним и тем же током и поэтому их можно заменить единственной обмоткой. Ось результирующей обмотки располагается пер-

пендикулярно оси обмотки фазы А. Вследствие этого между обмотками ВС и А не возникает никакой индуктивной связи и трехфазный АД можно заменить двухфазным. Аналогичный процесс происходит и при отключении АД, когда в начале процесса отключения он переходит из трехфазного режима в однофазный, а затем в режим выбега.

Каждый переход из одного режима работы АД в другой сопровождается переходным процессом со своими свободными и принужденными составляющими, а следовательно, изменением силы токов, потокосцеплений, вращающих моментов и потерь. Если время переходных процессов за цикл работы АД намного меньше времени цикла, то этими переходными процессами, по-видимому, можно пренебречь. Если же он работает от полупроводникового преобразователя, осуществляющего несколько переключений за период питающего тока, то эти процессы заслуживают внимания.

Анализ исследований и публикаций. Всем несимметричным режимам АД соответствует не круговое, а эллиптическое поле. Вопрос расчета АД с таким полем не нов. В свое время ему было уделено внимание в работах [1,2,3].

Рассмотрим указанные процессы сначала в общем аспекте, а затем промоделируем их на примере тиристорного регулятора напряжения, поскольку он является наиболее простым представителем полупроводниковых коммутаторов.

При работе трехфазного АД его трехфазная симметричная обмотка статора, питаемая от симметричного трехфазного напряжения, создает магнитный поток в воздушном зазоре, вращающийся в сторону вращения АД с частотой $\omega_1 = \omega f / p$, который наводит в роторе электродвижущую силу (ЭДС) E_{2s} пропорциональную скольжению s по значению $E_{2s} = E_2 \cdot s$ и частоте $f_2 = f_1 \cdot s$. В короткозамкнутом роторе эта ЭДС создает ток в обмотке, который в свою очередь создает вращающееся магнитное поле относительно ротора с частотой $\omega r = \omega_1 \cdot s$, неподвижное относительно поля статора и сдвинутое на угол χ в сторону отставания от поля статора. Эти два поля создают суммарное магнитное поле в зазоре АД, вращающееся с частотой ω_1 .

Поле ротора при работе в двигательном режиме отстает от суммарного поля на угол θ , называемый углом нагрузки, поскольку момент, развиваемый двигателем, пропорционален $\sin \theta$.

При работе АД от тиристорного регулятора напряжения (рисунок 1) в определенный момент времени, когда сила тока в одной из обмоток фаз переходит через ноль, и если угол управления тиристорами $\alpha > \varphi_i$, тиристор отключает эту обмотку при силе тока $i_A = 0$ и АД переходит в однофазный режим работы, т.е. в режим несимметричного питающего напряжения.

В этом режиме поле статора останавливается, а поле ротора вместе с ротором продолжает вращаться, в результате чего угол нагрузки θ начинает изменяться, а следовательно, изменяется и вращающий момент, разви-

аемый АД, т.е. начинается процесс его перехода из трехфазного режима в однофазный.

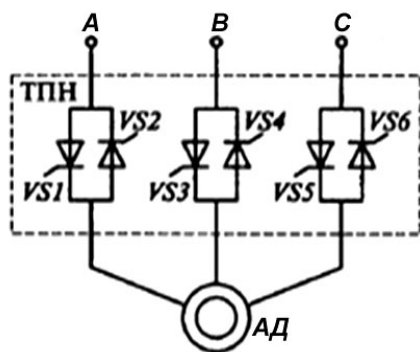


Рисунок 1 – Схема тиристорного регулятора напряжения

Однофазный ток статора однофазного АД создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на два поля, имеющие равные амплитуды и вращающиеся в противоположные стороны с одинаковой скоростью [2, 3]. При скорости ротора, не равной нулю, они вращаются относительно ротора с различной частотой, наводят в роторе ЭДС различной частоты и, следовательно, создают различное сопротивление ротора, равное для поля прямой последовательности $R_{21} = R_2' / s$, а для поля обратной последовательности $R_{22} = R_2' / (2-s)$.

Следовательно, в однофазном АД существует одновременно два фактора, влияющих на его работу: несимметричное питающее напряжение и неравное сопротивление прямой и обратной последовательности ротора. В результате воздействия этих факторов на характеристики АД при обрыве одной фазы во всех случаях создается установившийся ток несимметричного режима, отличающийся от тока в симметричном режиме, и следовательно, будет создаваться переходный режим из одного состояния в другое.

По истечении времени t_b , определяемого углом управления тиристора α ($t_b = \alpha / \omega f$), АД подключается к сети и начинается переходный процесс из однофазного в трехфазный, в результате чего он работает в квазистационарном режиме работы.

При таком способе управления [4, с.26] осуществляется дискретное воздействие на АД и в течение периода питающего напряжения 0,02 с (при $f = 50$ Гц) происходит чередование схем подключения статорных цепей к трехфазной питающей сети в следующей последовательности: трехфазное подключение, двухфазное подключение обмоток разных фаз, отключение всех обмоток.

В связи с этим даже в установившемся режиме наблюдаются пульсации вращающего момента АД с частотой 300 Гц (схема на рисунке 1 имеет пульсность $p = 6$) и, если быть точным, статический режим представляет собой квазистатический или установившийся динамический режим.

Отдельные элементы этого переходного процесса могут быть аперiodическими или колебательными. Очень хорошо известны колебательные процессы при работе АД от регулятора напряжения [5]. Аналогичные пе-

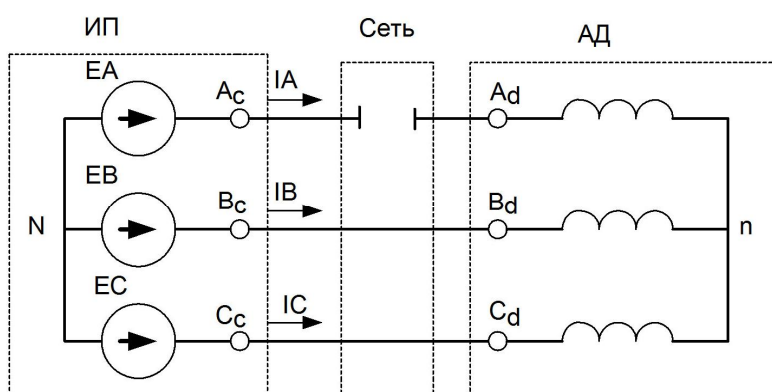
реходные процессы свойственны не только регулятору напряжения, но и всем приводам с тиристорными преобразователями.

Цель работы. Моделирование процессов в АД после его перехода из трехфазного режима работы в однофазный.

Результаты исследований. Рассмотрим схему электроснабжения АД, приведенную на рисунке 2 и содержащую трехфазный симметричный источник питания ИП, сеть и АД. Допустим, что в сети имеется несимметричный участок с оборванным проводом фазы А, заданы ЭДС генератора и все сопротивления элементов схемы. Требуется найти значения силы тока и напряжения.

Рассмотрим распределение напряжения и силы тока в АД при различных видах несимметрии. Согласно [6, с.294.] примем, что линейное напряжение между зажимами A_c , B_c и C_c создаются тремя источниками симметричных фазных ЭДС, равных $E_A = E_B = E_C = 380 \text{ В}$.

Рисунок 2 – Принципиальная схема несимметричной системы «источник – сеть – АД»



Заменяем несимметричный участок схемы (сеть) тремя источниками неизвестных напряжений

$$U_{A_c A_d} = U_{A_c} - U_{A_d}, U_{B_c B_d} = U_{B_c} - U_{B_d} \text{ и } U_{C_c C_d} = U_{C_c} - U_{C_d}.$$

Разложим неизвестные значения напряжения на симметричные составляющие U_1 , U_2 и U_0 , приняв фазу А за основную, и составим три независимые схемы (рисунок 3а, б, в) для прямой, обратной и нулевой последовательности. Запишем основные уравнения для схем прямой и обратной последовательности по второму закону Кирхгофа:

$$I_1 \cdot Z_1 + U_1 = E_1; \quad (1)$$

$$I_2 \cdot Z_2 + U_2 = 0; \quad (2)$$

$$I_0 \cdot Z_0 + U_0 = 0 \quad (3)$$

(схема нулевой последовательности разомкнута, так как отсутствует четвертый провод, следовательно, $I_0 = 0$).

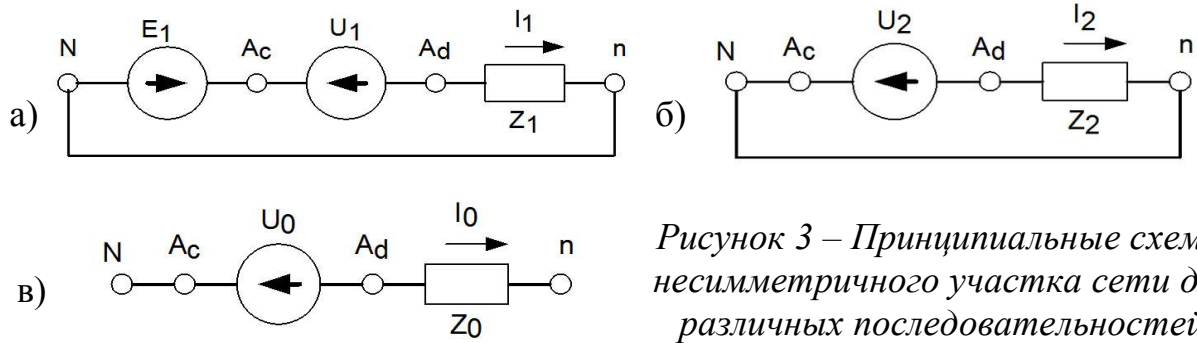


Рисунок 3 – Принципиальные схемы несимметричного участка сети для различных последовательностей

В этих трех уравнениях шесть неизвестных. Дополнительные три уравнения, составляемые, исходя из схемы и параметров несимметричного участка цепи для схемы замещения по рисунку 2, равны

$$IA=0,$$

$$UB_cB_d = UB_c - UB_d = 0, \quad (4)$$

$$UC_cC_d = UC_c - UC_d = 0. \quad (5)$$

Выражая в этих уравнениях значения силы тока и напряжения через их симметричные составляющие из (1), (2) и (3), получаем:

$$I_1 + I_2 = 0 \text{ или } I_2 = -I_1,$$

а из (4) и (5) соответственно

$$UB_cB_d = UB_cB_{d1} + UB_cB_{d2} + UB_cB_{d0} = a^2U_1 + a \cdot U_2 + U_0 = 0; \quad (6)$$

$$UC_{cd} = UC_{cd1} + UC_{cd2} + UC_{cd0} = aU_1 + a^2 \cdot U_2 + U_0 = 0. \quad (7)$$

Решив (6) и (7), получим:

$$U_2 = U_1 = U_0. \quad (8)$$

Решив совместно основные и дополнительные уравнения, найдем симметричные составляющие силы тока, а затем определим и все остальные искомые величины:

$$Z_1 \cdot I_1 + U_1 = E_1;$$

$$Z_2 \cdot I_2 + U_2 = 0.$$

Следовательно

$$I_1 = E_1 / (Z_1 + Z_2); \quad (9)$$

$$I_2 = -I_1; \quad (10)$$

$$IA = I_1 + I_2 = 0; \quad (11)$$

$$IB = IB_1 + IB_2 = a^2 \cdot I_1 + a \cdot I_2; \quad (12)$$

$$IC = IC_1 + IC_2 = a \cdot I_1 + a^2 \cdot I_2; \quad (13)$$

$$U_2 = -I_2 \cdot Z_2; \quad (14)$$

$$UA_cA_d = U_1 + U_2 + U_0; \quad (15)$$

$$UA_{dn} = I_1 \cdot Z_1 + I_2 \cdot Z_2; \quad (16)$$

$$UB_{dn} = a^2 \cdot Z_1 \cdot I_1 + a \cdot Z_2 \cdot I_2;$$

$$UC_{dn} = a \cdot Z_1 \cdot I_1 + a^2 \cdot Z_2 \cdot I_2;$$

$$UN_n = U_0.$$

В качестве примера исследуем работу АД типа ЭДКОФ250М4, предназначенного для скребкового конвейера, проанализированного нами в [7]. Номинальные данные: напряжение $U_{1n} = 660$ В, мощность $P_2 = 55$ кВт, сила тока $I_{1n} = 58$ А, скольжение $s = 0,03$. Рассмотрим влияние обрыва одного линейного провода, например, фазы А, на напряжение и силу тока АД для двух режимов его работы и сравним результаты с симметричной работой.

1. Симметричная задача до отключения тока фазы А:

1.1. Напряжение на фазах двигателя:

$U_{Asj} = 380$. Модуль $|U_{Asj}| = 380$ В, фаза $\varphi_{Asj} = 0^\circ$;

$U_{Bsj} = E_1 \cdot a^2$. Модуль $|U_{Bsj}| = 380$ В, фаза $\varphi_{UBsj} = -120^\circ$;

$U_{Csj} = E_1 \cdot a$. Модуль $|U_{Csj}| = 380$ В, фаза $\varphi_{UCsj} = 120^\circ$.

1.2. Сила тока двигателя:

$I_{Asj} = U_{Asj} / Z_{2fj}$. Модуль $I_{Asj} |I_{Asj}| = 57,423$ А, фаза $\varphi_{IAsj} = -31^\circ$;

$I_{Bsj} = U_{Bsj} / Z_{2fj}$. Модуль $I_{Bsj} |I_{Bsj}|$, фаза $\varphi_{IBsj} = \varphi_{UBsj} - \varphi_{IAsj} = 151^\circ$;

$I_{Csj} = U_{Csj} / Z_{2fj}$. Модуль $I_{Csj} |I_{Csj}|$, фаза $\varphi_{ICsj} = \varphi_{UCsj} - \varphi_{IAsj} = 89^\circ$.

Фазы тока $\varphi_{IBsj} = 151^\circ$ и $\varphi_{ICsj} = 89^\circ$ отличаются от фазы тока I_{Asj} на 120° и 240° соответственно.

1.3. Напряжение на нейтрали двигателя $U_{ns} = 0$.

2. Работа двигателя при скольжении $s = 1$ после отключения тока фазы А (равенстве сопротивления прямой и обратной последовательности $Z_{11} = Z_{12}$).

2.1. Напряжение на нейтрали [8] двигателя $U_{nns} = -EA/2$.

2.2. Обмотки фаз В и фаз С оказываются включенными последовательно на линейное напряжение U_{BC} .

2.3. Сила тока фазы – $I_B = U_{BC} / (2 \cdot Z_f) = \sqrt{3} \cdot U_f / (2 \cdot Z_f)$, т.е. изменяется её модуль с U_f / Z_f до $\sqrt{3} \cdot U_f / (2 \cdot Z_f)$ и фаза с $\varphi_{UBf} - \varphi_I$ до $\varphi_{UBC} - \varphi_I$.

Модуль силы тока снизился в $\sqrt{3} / 2 = 0,866$ раза и фаза на $\varphi_{UBC} - \varphi_{UBf} = 30^\circ$ град.

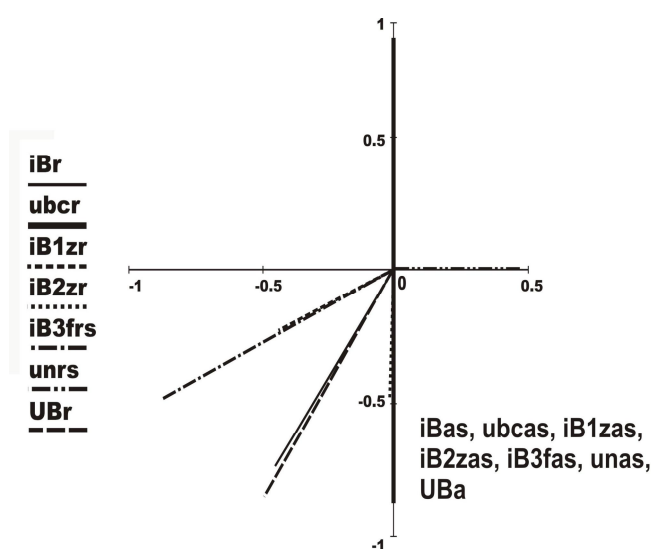
2.4. Напряжение между точками обрыва линии

$$U_{AcAd} = U_{An} = EA - U_n = 3/2 \cdot EA.$$

Векторные диаграммы для двигателя при $Z_{12} = Z_{11} = 5,653 + j \cdot 3,44$ приведены на рисунке 4.

Как следует из векторной диаграммы рисунка 4, при обрыве фазы и равенстве сопротивления прямой и обратной последовательности установившаяся сила тока после обрыва фазы отличается от установившейся силы тока симметричной работы: по модулю она меньше на 14 % и по фазе опережает на 30° . Такое изменение силы тока вызовет переходный процесс в АД, который необходимо исследовать. Кроме того, в установившемся

режиме происходит сдвиг напряжения нулевой последовательности на $0,5 \cdot E_1$, а ЭДС в отключенной обмотке фазы А не наводится.



iBs – сила тока несимметричного режима;

$ubcs$ – линейное напряжение U_{BC} ;

$iB1$ – прямая последовательность силы тока iB ;

$iB2$ – обратная последовательность силы тока iB ;

$iB3f$ – сила тока симметричного режима;

un – напряжение на нейтрали двигателя в несимметричном режиме работы АД;

uB – напряжение фазы В в симметричном режиме работы

Рисунок 4 – Векторная диаграмма асинхронного двигателя при обрыве фазы А и скольжении $s=1$

3. Работа двигателя при скольжении $s < 1$ после отключения фазы А, т.е. при неравенстве сопротивлений прямой и обратной последовательности $Z_{11} \neq Z_{12}$. По мере уменьшения скольжения и потока обратной последовательности потенциал нейтрали АД уменьшается, а сила тока, по отношению к симметричному режиму, – увеличивается.

3.1. Сопротивление АД при номинальном скольжении $s = 0,03$ для прямой последовательности $Z_{11} = 5,653 + j \cdot 3,44$, для обратной последовательности – $Z_{12} = 0,221 + j \cdot 0,915$.

3.2. Сила тока двигателя равна $I_B = \sqrt{3} \cdot E_1 / (Z_{11} + Z_{12}) = 90,0$ А, что составляет 1,567 от номинальной силы тока, равной $I_n = 57,4$ А.

3.3. При скольжении, близком нулю, в режимах, близких к холостому ходу (ХХ), и обрыве одной фазы сила тока статора примерно в $\sqrt{3}$ раза больше, чем при симметричном режиме работе [9].

На примере выбранного АД проанализируем значения его силы тока и напряжения при номинальном скольжении $s=0,03$ (результаты расчета даны в относительных единицах):

$$U = U_d / 380, I = I_d / I_3 f_n = I_d / 57,461,$$

где U_d – напряжение в вольтах, I_d – сила тока в амперах.

1. Сила тока фазы А.

1.1. Прямой последовательности согласно (9) при $E_1 = U_1 f_n = 380$ В

$$I_{a1} = E_1 / (Z_{11} + Z_{12}) = 0,726 - 0,539 \cdot j.$$

1.2. Обратной последовательности согласно (10)

$$I_{a2} = -I_{a1} = -0,726 + 0,539j.$$

1.3. Суммарная согласно (11): $I_A = I_{a1} + I_{a2} = 0$.

2. Сила тока фазы В.

2.1. Прямой последовательности согласно (12) $I_{B1} = a^2 \cdot I_1$,
где $a = e^{j \cdot 2 \cdot \pi / 3}$. Модуль $|I_{B1}| = 0,904$, фаза $\varphi I_{B1} = -156,6^\circ$.

2.2. Обратной последовательности согласно (12)

$$I_{B2} = a \cdot I_2. \text{ Модуль } |I_{B2}| = 0,904, \text{ фаза } \varphi I_{B2} = -96,5^\circ.$$

2.3. Суммарная согласно (12):

$$I_B = I_{B1} + I_{B2}. \text{ Модуль } |I_B| = 1,566, \text{ фаза } \varphi I_B = -126,5^\circ.$$

3. Сила тока фазы С согласно (13) поскольку $I_B + I_C = 0$ равна $I_C = -I_B$.
Эти данные совпадают с данными, полученными из дифференциальных уравнений в [5].

4. Напряжение на несимметричном участке сети.

4.1. Обратной последовательности U_2 согласно (14):

$$U_2 = -I_2 \cdot Z_2. \text{ Модуль } |U_2| = 0,129, \text{ фаза } \varphi U_2 = 39,9^\circ.$$

4.2. Прямой последовательности U_2 согласно (8): $U_1 = U_2$.

4.3. Нулевой последовательности U_0 согласно (8): $U_0 = U_2$.

4.4. На оборванном участке линии фазы А между точками A_c и A_d согласно (15):

$$U_{A_c A_d} = U_1 + U_2 + U_0 = 0,296 + 0,248j.$$

Модуль $|U_{A_c A_d}| = 0,386$, фаза $\varphi U_{A_c A_d} = 39,9^\circ$.

5. Напряжение на обмотке отключенной фазы А.

5.1. Прямой последовательности согласно (16):

$$U_{A_{dn1}} = I_1 \cdot Z_1. \text{ Модуль } |U_{A_{dn1}}| = 0,905, \text{ фаза } \varphi U_{A_{dn1}} = -5,2^\circ.$$

5.2. Обратной последовательности согласно (16):

$$U_{A_{dn2}} = -U_2. \text{ Модуль } |U_{A_{dn2}}| = 0,129, \text{ фаза } \varphi U_{A_{dn2}} = -140,1^\circ.$$

5.3. Суммарное:

Модуль $|U_{A_{dn}}| = 0,819$, фаза $\varphi U_{A_{dn}} = -11,6^\circ$.

6. Напряжение на обмотке фазы В.

6.1. Прямой последовательности:

Модуль $|U_{B_{dn1}}| = 0,905$, фаза $\varphi U_{B_{dn1}} = -125,2^\circ$.

6.2. Обратной последовательности:

Модуль $|U_{B_{dn2}}| = 0,129$, фаза $\varphi U_{B_{dn2}} = -20,1^\circ$.

6.3. Суммарное:

Модуль $|U_{B_{dn}}| = 0,88$, фаза $\varphi U_{B_{dn}} = -117,1^\circ$.

7. Напряжение на обмотке фазы С.

7.1. Прямой последовательности согласно (13):

$$U_{C_{dn1}} = 0,905. \text{ Фаза } 114,8^\circ.$$

7.2. Обратной последовательности:

$$U_{C_{dn2}} = 0,129. \text{ Фаза } 99,9^\circ.$$

7.3. Суммарное: $U_{C_{dn}} = 1,03$. Фаза $\varphi U_{C_{dn}} = 112,9^\circ$.

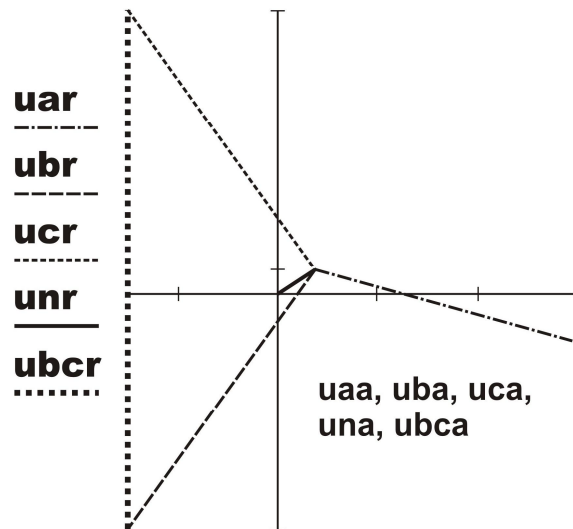
8. Напряжение линейное U_{BC} :

$$U_{BC_{dn}} = U_{B_{dn}} - U_{C_{dn}} = -658,2 \cdot j. \text{ Фаза } -90^\circ.$$

9. Напряжение нулевой точки АД относительно нулевой точки источника

$$U_n = U_0 = 0,129. \text{ Фаза } 39,9^\circ.$$

Как следует из результатов моделирования напряжения для несимметричной модели с сопротивлением прямой и обратной последовательности, соответствующим скольжению, равному $s=0,03$ (рисунок 5), в отключенной обмотке фазы А:



u_a, u_b, u_c – напряжение на обмотках фаз АД относительно напряжения на его нейтрали в несимметричном режиме;

u_{in}, u_{ibc} – линейное напряжение U_{BC} в несимметричном режиме

Рисунок 5 – Векторная диаграмма напряжения асинхронного двигателя при обрыве фазы А и неравенстве сопротивлений прямой и обратной последовательности

1. Наводится ЭДС $I_A = 0,82 U_n$.

2. Создается несимметричная система напряжений с модулями

$U_B = 0,88 \cdot U_n$ и $U_C = 1,03 \cdot U_n$ и фазовыми сдвигами $\varphi_{AB} = 105,5^\circ$, $\varphi_{BC} = 130,0^\circ$, $\varphi_{AC} = 124,5^\circ$.

3. Создается напряжение на нейтрали $U_{Nn} = (-0,401 - 0,784 \cdot j) \cdot U_n$.

Моделирование силы тока для аналогичного случая приведено на рисунке 6. При обрыве фазы и неравенстве сопротивления прямой и обратной последовательности установившаяся сила тока после обрыва фазы отличается от установившейся силы тока симметричной работы: по значению она больше на 58 % и по фазе опережает на $24,5^\circ$. Такое изменение силы тока вызовет переходный процесс в АД, который необходимо исследовать.

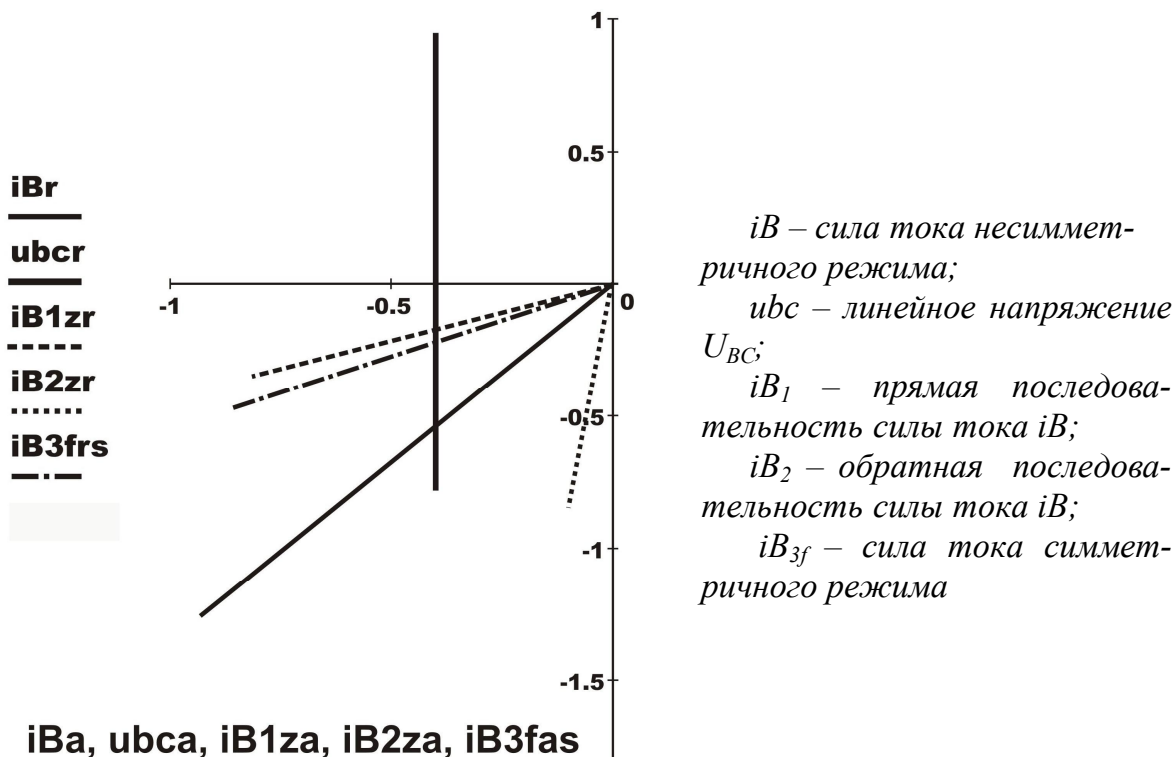


Рисунок 6 – Векторная диаграмма силы тока асинхронного двигателя при обрыве фазы А и неравенстве сопротивления прямой и обратной последовательности

Выводы:

1. При обрыве одной фазы сети, питающей статор АД, существуют два источника несимметрии: несимметричное питающее напряжение и неравное сопротивление прямой и обратной последовательности ротора.

2. Анализируя влияние несимметрии питающего напряжения на характеристики АД, можно отметить, что при равном сопротивлении прямой и обратной последовательности ($s=1$):

а) сила тока рабочей обмотки фазы равна 0,866 от соответствующей силы тока симметричного режима и опережает её на 30° ;

б) напряжение на нейтрали равно $U_{nns} = -EA/2$;

в) напряжение между точками обрыва линии –

$$U_{AcAd} = U_{An} = EA - U_n = 3/2 \cdot EA.$$

3. Несимметрия напряжения и силы тока обмоток фаз АД, вызванная неравенством сопротивления прямой и обратной последовательности ротора, зависит от скольжения АД. Сила тока в несимметричном режиме при скольжении, близком к скольжению ХХ, будет превышать силу тока симметричного режима в $\sqrt{3}$ раза при том же скольжении и опережать силу тока симметричного режима на угол, зависящий от скольжения.

4. Поскольку прямое и обратное поля создают разные по знаку вращающие моменты M_1 и M_2 , то результирующий момент равен

$$M = M_1 - M_2.$$

Следовательно, при неизменном моменте сопротивления и обрыве фазы возрастет скольжение АД, а значит и его сила тока.

5. Установившаяся (принужденная) сила тока несимметричного режима во всех случаях несимметрии отличается от силы тока в симметричном режиме, следовательно, будет иметь место и свободная составляющая силы тока в переходном режиме. Значение этой составляющей будет зависеть от скольжения АД в момент обрыва провода.

Список литературы

1. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац: пер. с нем.– М.–Л., Госэнергоиздат, 1963.– 735 с.

2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины /А.В. Иванов-Смоленский.– М.: Энергия, 1980. – 927 с.

3. Костенко М.П. Электрические машины. Специальная часть /М.П. Костенко.– М.: ГосЭнергоИздат, 1949.– 712 с.

4. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я.Браславский, З.Ш.Ишматов, В.Н.Поляков: под ред. И.Я. Браславского.– М.: АСАДЕМА, 2004. – 202 с.

5. Маренич К.Н. Асинхронный электропривод горных машин с тиристорными коммутаторами / К.Н.Маренич.– Донецк, ДонГТУ, 1997.– 64 с.

6. Основы теории цепей / [Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.].– М.: Энергия, 1975.– 752 с.

7. Ковалев Е.Б. Моделирование процесса перехода асинхронного двигателя с трехфазного режима работы на однофазный / Е.Б.Ковалев // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч.тр. УкрНИИВЭ.–Донецк: ООО «АИР», 2012. – С. 98–107.

8. Электротехника: в 3 кн. Кн.1. Теория электрических и магнитных цепей. Электрические измерения / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х.Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 505 с.

9. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л.Г.Мамиконянца. – М.:Энергоатомиздат,1984.- 240 с.