

ПРОБЛЕМАТИКА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ СИТЕМЫ «КАБЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ» УЧАСТКА ШАХТЫ

Маренич К.Н., канд. тех. наук., доц.,
Донецкий государственный технический университет

Определены факторы электротравматизма системы “кабель – двигатель” электрической сети участка шахты при её отключении со стороны пускателя.

The factors of electrical hazard of system “a cable – engine” of an electrical grid of a site of mine at its disconnect on the part of the actuator are determinated.

Основным фактором электробезопасности шахтной низковольтной электрической сети участка является применение аппаратов защиты от утечек (АЗ). Будучи установленными в распреустройствах низкого напряжения трансформаторных подстанций, они контролируют сопротивление утечки любого из включенных присоединений и формируют команду на защитное отключение напряжения на участке если активное сопротивление утечки (сопротивление между “фазой” и “землей”) любого из присоединений оказалось ниже предельного заданного. В процессе защитного отключения разъединяются силовые контакты: автоматических выключателей трансформаторной подстанции и распредпункта участка; всех включенных пускателей [1].

Для обеспечения электробезопасности присоединения магистрального кабеля (между подстанцией и распредпунктом участка) функция АЗ достаточна, однако электробезопасность наиболее подверженных повреждениям и преобладающих на участке гибких кабелей обеспечивается не в полной мере. Причиной этого является наличие ЭДС вращения, индуцируемой вращающимся полем токов ротора на зажимах статора присоединённого к кабелю асинхронного двигателя (АД) после его отключения [2]:

$$e_v = K_1 U_{1m} e^{-t/T_s} \cos((1-s)\omega t + \psi), \quad (1)$$

где U_{1m} – амплитуда напряжения сети; S – скольжение АД; ψ – начальная фаза ЭДС вращения; ω – частота напряжения сети; K_1 – коэффициент, учитывающий снижение амплитуды ЭДС вращения по

сравнению с амплитудой напряжения сети. При номинальной нагрузке $0,83 < K_I < 0,85$; в режиме холостого хода $0,92 < K_I < 0,95$.

В режиме свободного выбега АД амплитуда ЭДС вращения снижается экспоненциально с постоянной времени T_ω :

$$T_\omega = U_1 K_\mu / (I_0 R_{\Sigma 1} \omega); \quad (2)$$

где I_0 – ток холостого хода АД, $R_{\Sigma 1}$ – эквивалентное активное сопротивление основного контура АД с учётом параллельно включенных сопротивлений контура, образованных пусковой и рабочей клетками АД, K_μ – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи АД [2]. В общем случае: $(1, 0 < K_\mu < 1,1)$; для АД с водяным охлаждением: $(1,8 < K_\mu < 2,0)$. Параметр T_ω увеличивается с ростом мощности АД, т.к. при этом снижается величина $R_{\Sigma 1}$.

Исследованиями [3] установлено, что для двигателей средней мощности максимальное время снижения ЭДС вращения до уровня, близкого к нулю, составляет в среднем, 4,5 с.

Таким образом, в случае касания человеком находящихся под напряжением токоведущих элементов сети между пускателем и АД и отключения по этой причине электросети со стороны питающей подстанции не предотвращается опасность электротравматизма, т.к. поражающим фактором остаётся ЭДС вращения АД. Положение усугубляется тем, что после отключения силовых коммутационных аппаратов со стороны питающей подстанции отсоединяется и компенсатор АЗ. Емкостные составляющие сопротивлений утечки, обусловленные параметрами изоляции гибкого кабеля (между пускателем и двигателем) оказываются некомпенсированными и существенно увеличивают ток в цепи возникшей утечки (ток через тело человека, прикоснувшегося к фазе сети, находящейся под напряжением).

Опасность электротравматизма, обусловленного воздействием ЭДС вращения АД, обусловлена ещё и тем, что такое воздействие на человека, прикоснувшегося к находящемуся под напряжением токоведущему элементу сети, имеет место после воздействия напряжения сети. Таким образом, общая продолжительность существования электропоражающего фактора состоит из:

- продолжительности выявления утечки (Δt_1);
- продолжительности срабатывания АЗ (Δt_2);
- продолжительности разъединения силовых контактов коммутационного аппарата (Δt_3);
- продолжительности существования опасных уровней экспо-

ненциально снижающейся ЭДС вращения АД (Δt_4).

Техническая характеристика современных АЗ (АЗПБ, АЗУР) и коммутационных аппаратов позволяет выдержать интервал ($\Delta t_1 + \Delta t_2$) на уровне, не превышающем 0,1 с. Предельный интервал (Δt_3) для автоматического выключателя серии А-3700У не превышает 0,04 с. [1]. Однако в течение этого непродолжительного интервала времени ($\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$) в сети протекает переходный процесс, связанный с появлением асимметрии – однофазной утечки и сопровождающийся свободной и вынужденной составляющими токов утечки [2]:

$$i_y = (U_m / R_y) (A \sin(\omega t + \varphi + \alpha) + (\sin \varphi - A \sin(\varphi + \alpha)) e^{-\delta t}); \quad (3)$$

$$A = \sqrt{(R_{uz}^2 + X_c^2) / (R_{uz}^2 + X_c^2 (1 + (R_{uz} / R_y))^2)}; \quad (4)$$

$$\delta = 1 / R_{\Sigma} / C_c; \quad (5)$$

$$R_{\Sigma} = R_{uz} R_y / (R_{uz} + R_y); \quad (6)$$

На его начальном этапе амплитуда тока утечки может превышать 100 – 200 мА. После отключения сети от трансформатора подстанции сохраняется воздействие ЭДС вращения АД. Ограничивающим фактором выступают активные и индуктивные сопротивления: участка гибкого кабеля (от АД до места утечки); статора и приведенные сопротивления ротора АД. Однако по сравнению с сопротивлениями изоляции кабеля и утечки их величины несоизмеримо малы, существенного влияния на величину тока утечки не оказывают и в дальнейших расчётах ими допустимо пренебречь. В целом, расчётная схема участка сети при моделировании рассматриваемых процессов будет иметь вид согласно рис. 1.

Расчёт тока утечки в такой схеме подчиняется положениям классической теории электротехники. Ток в фазе А определяется отношением (7)

$$\ddot{I}_A = \dot{U}_{AO} / Z_A; \quad (7)$$

Напряжение на нагрузке фазы А определяется из выражений:

$$\dot{U}_{A0} = \dot{E}_B Z_{B(C)} - Z_A / (Z_{B(C)} - 2 Z_A); \quad (8)$$

$$Z_{B(C)} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{R_{uz}(-j/\omega C)}{R_{uz} - j/\omega C}; \quad (9)$$

$$Z_A = R_1 + j\omega L_1 + \frac{R_A(-j/\omega C)}{R_A - j/\omega C}; \quad (10)$$

$$R_A = R_y R_{uz} / (R_y + R_{uz}); \quad (11)$$

где E_B - вектор ЭДС вращения; C - емкость утечки в фазе; R_l ; L_l - общие активное сопротивление и индуктивность фазы системы «кабель - двигатель», образованные последовательно включенными соответствующими сопротивлениями и индуктивностями АД и кабеля до места утечки.

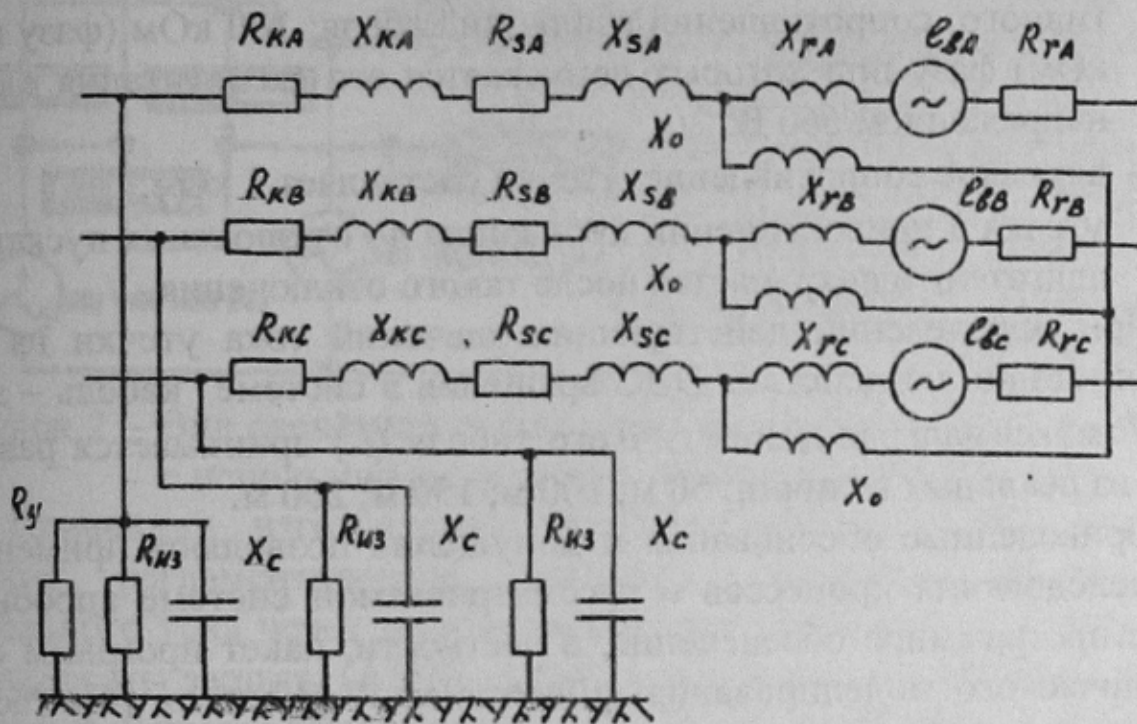


Рисунок 1 - Расчётная схема участка электросети для исследования поражающего действия ЭДС вращения АД

Вектор тока в фазе А определяется выражением:

$$\ddot{I}_{A1} = \dot{I}_A \frac{-j/\omega C}{R_A - j/\omega C}; \quad (12)$$

где R_A - активное сопротивление, образованное параллельно присоединёнными сопротивлением изоляции кабеля R_{uz} и сопротивлением утечки R_y . Вектор тока, проходящего по сопротивлению утечки:

$$\ddot{I}_y = \dot{I}_A \frac{\ddot{R}_{uz}}{R_y + R_{uz}}; \quad (13)$$

Моделирование процессов в системе «кабель - двигатель» при её отключении со стороны пускателя вследствие возникновения однофазной утечки тока на землю целесообразно выполнить со следующими допущениями:

- отключаемое присоединение представляет собой гибкий кабель типа КГЭШ, подключенный к статору одного АД;
- удельные активное и индуктивное сопротивления силовых жил кабеля соответствуют принятому его сечению типажного ряда: 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120 кв. мм;
- ёмкостное сопротивление изоляции кабеля соответствует принятым его сечению и длине;
- исследования производятся для двух вероятных уровней активного сопротивления изоляции кабеля: 100 кОм (фазу и 31 кОм) фазу при которых допускается его эксплуатация в сети напряжением 660 В;
- активное сопротивление утечки составляет 1 кОм;
- утечка в присоединении произошла до отключения пускателя двигателя и сохраняется после такого отключения.

При определении действующих значений тока утечки на начальной стадии воздействия ЭДС вращения в системе “кабель – двигатель” максимальная длина гибкого кабеля (l) принимается равной одной из реальных величин: 50 м; 100 м; 150 м; 200 м.

Приведенные обоснования и допущения позволяют применить для исследования процессов в рассматриваемой системе апробированное программное обеспечение, в частности, пакет программ схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» [4]. Расчёт начального уровня тока утечки (после отключения пускателя) сводится к построению на экране монитора ПЭВМ виртуальной расчетной схемы сети с указанием мест присоединения измерительных приборов. Вид такой схемы приведен на рис. 2 (параметры схемы сети соответствуют кабелю сечением 4 кв.мм при длине 200 м, $R_{из} = 31$ кОм/фазу). Показания приборов индицируются в зависимости от вводимых параметров элементов схемы.

Расчёт производился для двух уровней действующего значения фазной ЭДС вращения: 361 В (0,95 от номинального напряжения в режиме холостого хода АД) и 323 В (0,85 от номинального напряжения при работе АД под нагрузкой). Полученные в результате величины тока утечки (через сопротивление тела человека 1 кОм) представлены на рис.3 и в табл.1; табл. 2.

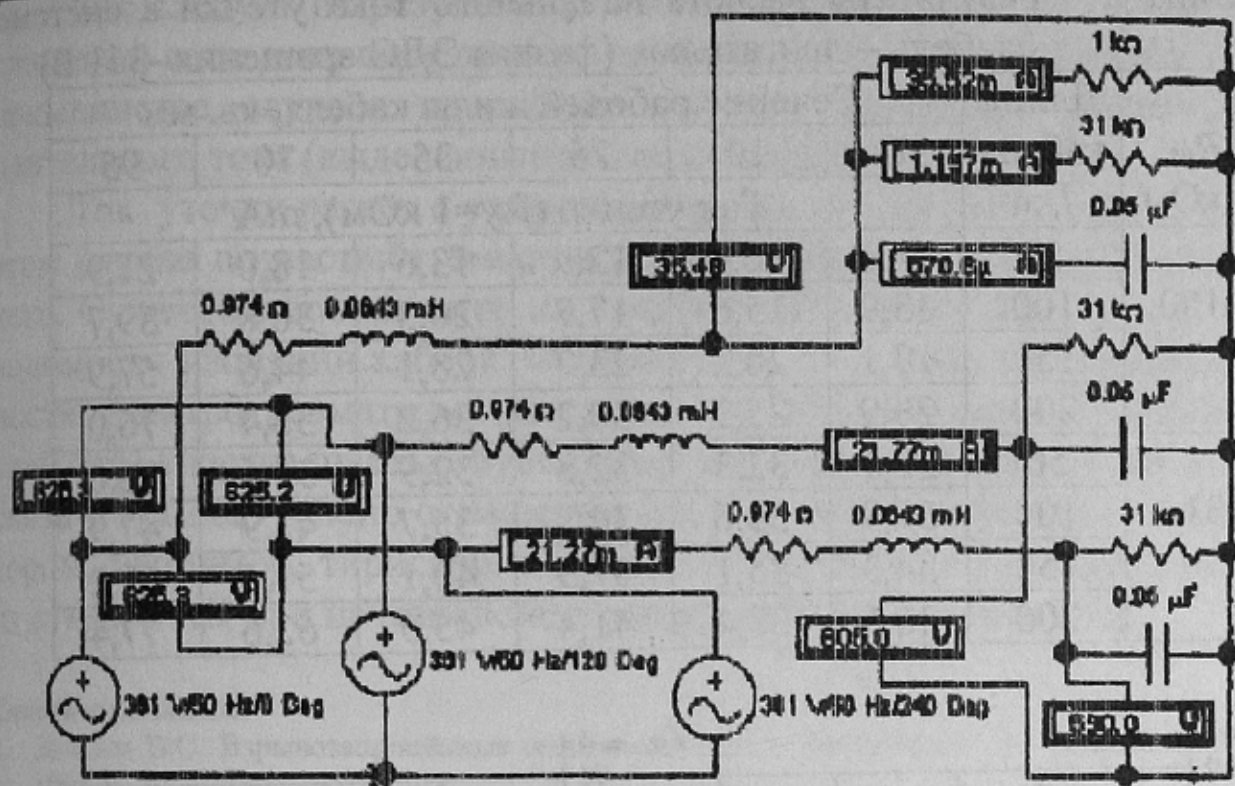


Рисунок 2 – Вид расчётной схемы сети при исследовании процессов с использованием пакета «Electronics Workbench»

Правилами изготовления взрывозащищённого электрооборудования регламентирована величина предельно безопасного длительного тока через тело человека, равная 30 мА [5]. Современные аппараты защиты (АЗПБ, АЗУР) настроены на срабатывание при снижении сопротивления однофазной утечки до 30 кОм, реагируя на длительный ток утечки I_u , равный 25 мА [1].

Таблица 1 – Результаты расчета начального тока утечки в системе «кабель – двигатель» (фазная ЭДС вращения -323 В)

$R_{из}$, кОм	Длина кабеля l , м	Сечение рабочей жилы кабеля, кв. мм					
		6	10	25	35	70	95
Ток утечки ($R_y=1$ кОм), мА							
100	50	10,2	10,7	11,6	12,2	16,1	19,6
	100	12,4	14,0	15,9	18,2	27,6	35,5
	150	15,3	18,1	21,2	25,1	39,9	51,8
	200	18,7	22,6	27,0	32,4	52,3	68,0
31	50	28,7	28,9	29,3	29,5	31,0	32,7
	100	29,5	30,1	31,2	32,0	37,5	42,9
	150	30,7	31,9	33,6	35,9	46,2	55,6
	200	32,2	34,4	37,1	40,7	56,0	69,3

Таблиця 2 – Результати расчета начального тока утечки а системе «кабель – двигатель» (фазная ЭДС вращения -361 В)

$R_{из},$ кОм	Длина кабеля $l, м$	Сечение рабочей жилы кабеля, кв. мм					
		6	10	25	35	70	95
		Ток утечки ($R_y=1$ кОм), мА					
100	50	11,4	12,0	12,9	13,6	18,0	21,9
	100	13,9	15,6	17,7	20,3	30,8	39,7
	150	17,1	20,2	23,7	28,1	44,6	57,9
	200	20,9	25,3	30,2	36,2	58,4	76,0
31	50	32,1	32,3	32,8	32,9	34,6	36,6
	100	32,9	33,6	34,8	35,7	41,9	47,9
	150	34,3	35,1	37,5	40,1	51,6	62,2
	200	36,6	38,4	41,4	45,5	62,6	77,4

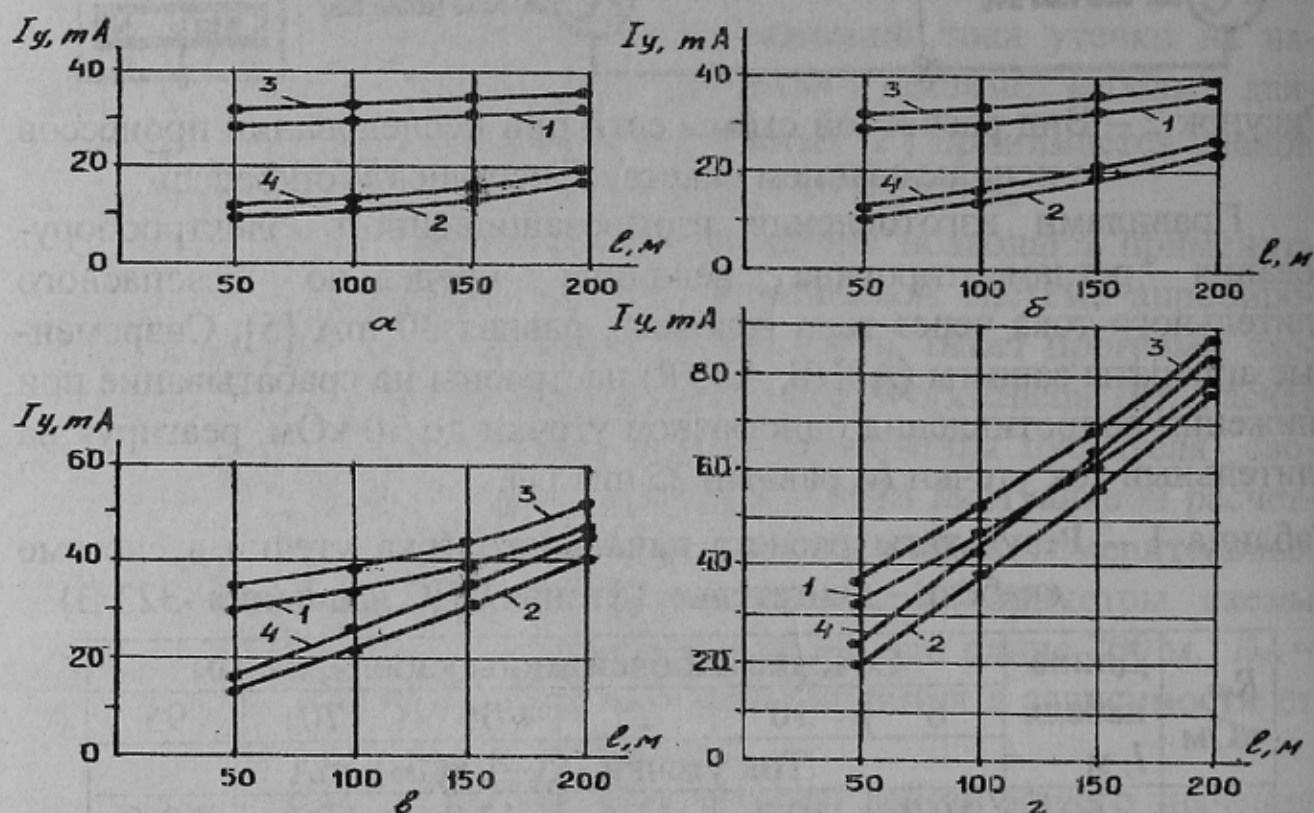


Рисунок 3 – Расчётные значения токов утечки, обусловленных действием ЭДС вращения АД при величинах сечений рабочих жил кабеля: а - 4 мм²; б- 16 мм²; в-50 мм²; г - 120 мм² в зависимости от длины кабеля l (м):

- 1 - $E_{\phi} = 323$ В; $R_{из} = 31$ кОм/фазу; 2- $E_{\phi} = 323$ В; $R_{из} = 100$ кОм/фазу;
 3- $E_{\phi} = 361$ В; $R_{из} = 31$ кОм/фазу; 4- $E_{\phi} = 361$ В; $R_{из} = 100$ кОм/фазу.

Как следует из результатов исследований, после защитного отключения сети величина тока I_u , генерируемого ЭДС вращения АД в большинстве случаев превышает уровень предельно безопасного длительного тока (выделенные колонки табл.1 и табл. 2).

Ток утечки растёт с увеличением длины и сечения кабеля, т.к. в этом случае возрастают ёмкостные проводимости изоляции последнего. Существенное влияние на этот рост оказывает повышение проводимости изоляции кабеля. Основная причина потенциальной опасности электротравматизма системы "кабель-двигатель" электрической сети участка шахты обусловлена влиянием ЭДС вращения АД. В связи с этим актуально оснащение АД быстродействующим коммутатором, например, тиристорным, электрически отключающим кабель от статора АД при исчезновении напряжения питающей сети.

Список источников.

1. Дзюбан В.С. Взрывозащищённые аппараты низкого напряжения. М. Энергоатомиздат, 1993. С. 93 – 173.
2. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. М., Недра. 1982. С. 12 - 18.
3. Дзюбан В.С., Риман Я.С. Об электромагнитной постоянной времени затухания обратной э.д.с. шахтных электродвигателей. – В кн. Взрывобезопасное электрооборудование. Вып. 6 М., Энергия, 1969.
4. Панфилов Д.И. и др. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench. Т1. Электротехника.- М.: ДОДЭКА, 1999.- 304 с.
5. Правила изготовления взрывозащищённого электрооборудования. М., Энергия, 1969. - 222 с.