

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА КАК ФАКТОРА НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ

Маренич К.Н., Руссиян С.А

Донецкий национальный технический университет, gea@dgtu.donetsk.ua

С целью обеспечения высокого уровня безопасности эксплуатации в шахтных участковых электрических сетях предусмотрен режим изолированной нейтрали трансформатора с обязательным применением защиты от утечек тока на землю. В современных аппаратах защитного отключения (АЗО) реализуется принцип контроля величины оперативного тока, подаваемого в сеть, и сопоставления её с величиной предельно допустимого тока, циркулирующего по внутреннему контуру АЗО. Факторами, приводящими к увеличению оперативного тока АЗО, обычно являются: ухудшение изоляции в ответвлении электросети участка шахты либо появление однофазной утечки тока на землю, например, вследствие касания человеком токоведущего элемента, находящегося под напряжением.

Однако имеются и другие факторы, проявление которых способно вызвать срабатывание АЗО. К ним относятся коммутационные перенапряжения, вызванные контакторным включением и отключением асинхронных двигателей потребителей участка. Такие процессы сопровождаются кратковременным повышением контролируемого параметра в АЗО и способны вызвать ложное срабатывание защиты при наличии определённых параметров сети, обусловленных её конфигурацией [1].

Основным коммутационным узлом низковольтной электросети участка шахты является контактор пускателя. Неодновременность гашения дуги между его силовыми контактами приводит к появлению разности потенциалов между нейтралью сети и землёй, что способно вызвать кратковременное увеличение контролируемого параметра в АЗО и срабатывание последнего.

Общие тенденции изменения параметров коммутационного переходного процесса в участковой электросети шахты установлены в исследованиях [2]. Однако полученные результаты требуют уточнения, так как ранее проведенными исследованиями не учитывалось влияние мощности участковой трансформаторной подстанции, а в исследовании [1] применённый метод математического описания процесса обусловил ряд ограничений в выдвинутых допущениях, что снизило точность результата. В частности, громоздкость изображения напряжения на ёмкости неотключаемой части сети не позволила воспользоваться теоремой разложения при переходе к оригиналу.

Процесс горения электрической дуги между контактами контактора во время коммутации силовой цепи асинхронного двигателя определяются совокупным действием ряда факторов. К ним, в частности, относятся: активно-реактивные параметры кабелей и коммутируемой нагрузки; площадь и конфигурация поверхностей контактов контактора и скорость их разъединения;

Особенности протекания процессов, обусловленных горением электрической дуги, исследованы и описаны математически [3]. Однако, в рассматриваемом случае объектом исследования является электротехнический комплекс, содержащий, в частности, оперативные цепи АЗО, активно-емкостные составляющие проводимости кабелей и динамическую модель коммутационного аппарата, в которой учтены стохастические процессы дугообразования. Поэтому представляется актуальным уточнение параметров объекта исследования применительно к воздействию коммутационных процессов в участковой электросети на устойчивость работы аппарата защиты базовой серии, в частности, АЗУР-4 (разработка УкрНИИВЭ, г. Донецк, Украина).

Объектом исследования является электротехнический комплекс (ЭТК) технологического участка шахты в состоянии контакторного отключения ответвления, содержащего АД потребителя. Его расчётная схема приведена на рис. 1. Параметры трансформаторной подстанции участка, асинхронного двигателя потребителя, ёмкости изоляции неотключаемой и отключаемой частей электросети относительно земли представлены соответствующими элементами схемы.

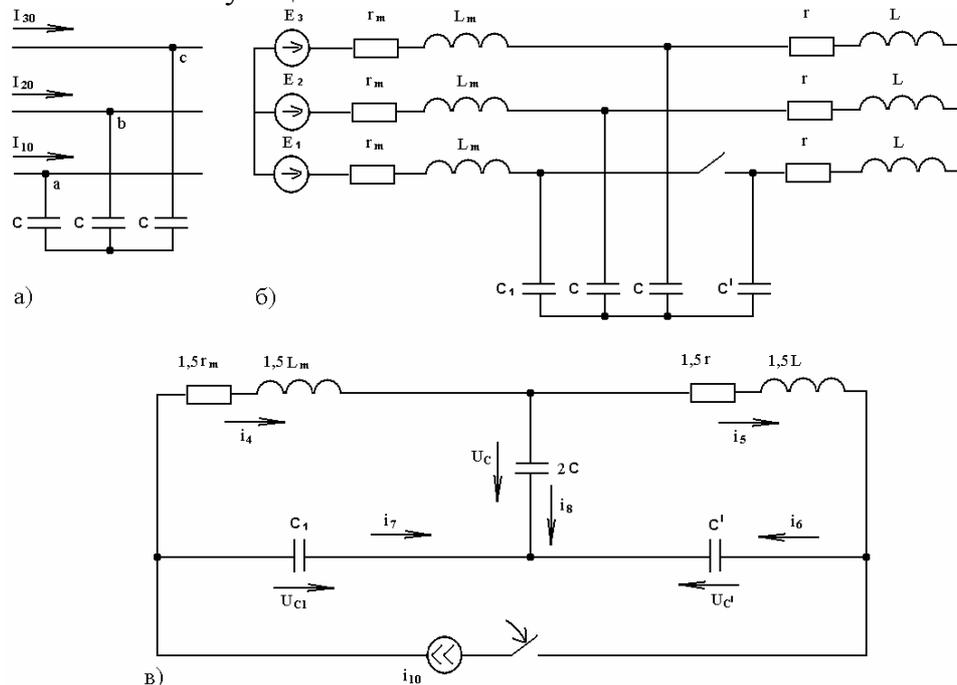


Рис. 1. Расчётная схема до коммутации (а); после начала отключения электродвигателя (б) и эквивалентная схема замещения (в)

Аналитическое описание процессов в данной схеме состоит в следующем:

а) состояние “до коммутации” (рис. 1.а):

$$I_{10m} = \frac{E_{1m}}{r_m + j\omega L_m + r + j\omega L}; \quad (1)$$

$$\varphi_{am} = I_{10m} (r + j\omega L); \quad (2)$$

$$\varphi_a(t) = \text{Im} \varphi_{am} e^{j\omega t}, \quad (3)$$

где r_m, L_m, r, L - активные сопротивления и индуктивности трансформатора и асинхронного двигателя;

б) в состоянии “после коммутации”, - применительно к схеме замещения (рис. 1.в), математическая модель процесса описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{cases} i_5 = i_6 - i_{10}; \\ i_{10} = i_7 + i_4; \\ i_4 = i_8 + i_5; \end{cases} \right\} \text{— уравнения по узлам}$$

$$\left. \begin{cases} U_C - U_{C1} + 1,5i_4 r_m + 1,5L_m \frac{di_4}{dt} = 0; \\ 1,5ri_5 + 1,5L \frac{di_5}{dt} + U_{C'} - U_C = 0, \end{cases} \right\} \text{— уравнения по контурам} \quad (4)$$

где $i_6 = C' \frac{dU_{C'}}{dt}$; $i_7 = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt}$; $i_8 = 2C \frac{dU_C}{dt}$;

$$i_4(0_+) = 0; \quad i_5(0_+) = 0; \quad U_C(0_+) = 0; \quad U_{C1}(0_+) = 0; \quad U_{C'}(0_+) = 0.$$

Тогда напряжение на ёмкости неотключаемой части сети принимает значение:

$$U_{C1np} = \varphi_a + U_{C1}. \quad (5)$$

Исследование коммутационных процессов в электросети участка шахты с учётом существования электрической дуги приемлемо выполнить средствами компьютерного моделирования.

Вероятностный характер продолжительности существования дуги между контактными группами отдельных фаз контактора в процессе его отключения учитывается расчётной схемой моделирования, представленной на рис. 2. Возможные кратковременные угасания электрической дуги в процессе её горения случайны и имитируются последовательными контактами K_1 , возможные восстановления «металлических» замыканий между силовыми контактами контактора в процессе их расхождения – случайны и имитируются параллельными контактами K_2 . Собственные сопротивления электрической дуги в фазах контактора имитируются резисторами R .

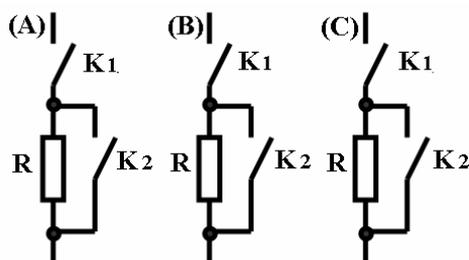


Рис.2. Расчётная схема моделирования дугообразования при отключении контактора

На рис. 3 приведена расчётная модель объекта исследования. В её состав входят активно-реактивные сопротивления рабочих жил и изоляции кабельной сети, параметры асинхронного двигателя потребителя, параметры цепи оперативного тока аппарата защитного отключения серии АЗУР-4.

Приняты следующие допущения:

- в сети действует линейное трёхфазное номинальное напряжение 660 В;
- отключаемая часть сети (после KM_1) представлена кабелем КГЭШ3х95 с удельной ёмкостью фазы изоляции – 1,15 мкФ/км длиной 50 м;
- активное сопротивление изоляции отключаемого кабеля $R_{из} = 70$ кОм/фазу;
- продолжительность горения дуги – величина случайная и находится в диапазоне от 0,5 периода до 10 периодов напряжения сети (определяется спецификой расхождения контактов каждой конкретной контактной группы).

С учётом указанных допущений и структуры цепи АЗО корректируется схема замещения ЭТК участка шахты (рис. 4). Параметром, вызывающим срабатывание АЗО является рост напряжения на резисторе R_5 , создаваемого оперативным током. Заряд ёмкости C_{ym1} в момент начала её коммутации определяется формулой (5). Продолжительности состояний объекта случайны и иллюстрируются соответствующим цветом (штриховкой) диаграмм состояний (рис.5).

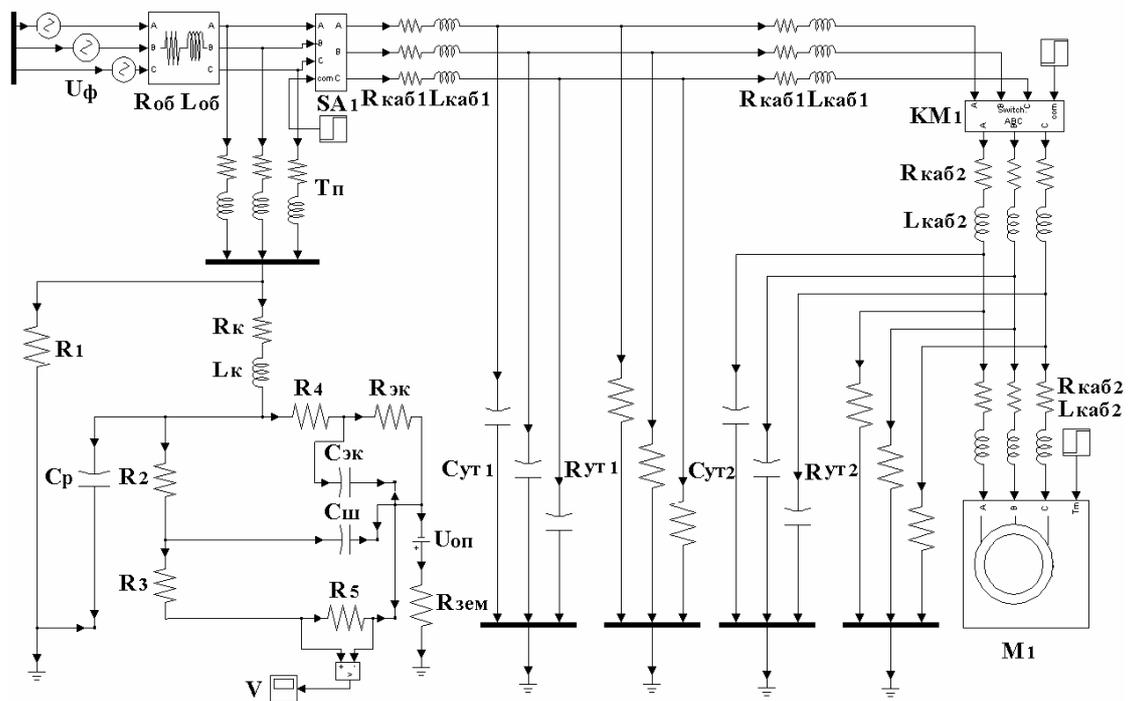


Рис. 3. Расчетная модель схемы электросети участка шахты с элементами цепи оперативного тока аппарата АЗУР-4: R_{OB} , L_{OB} – вторичная обмотка трансформатора подстанции; KM_1 – контактор пускателя; M_1 – двигатель; V – вольтметр

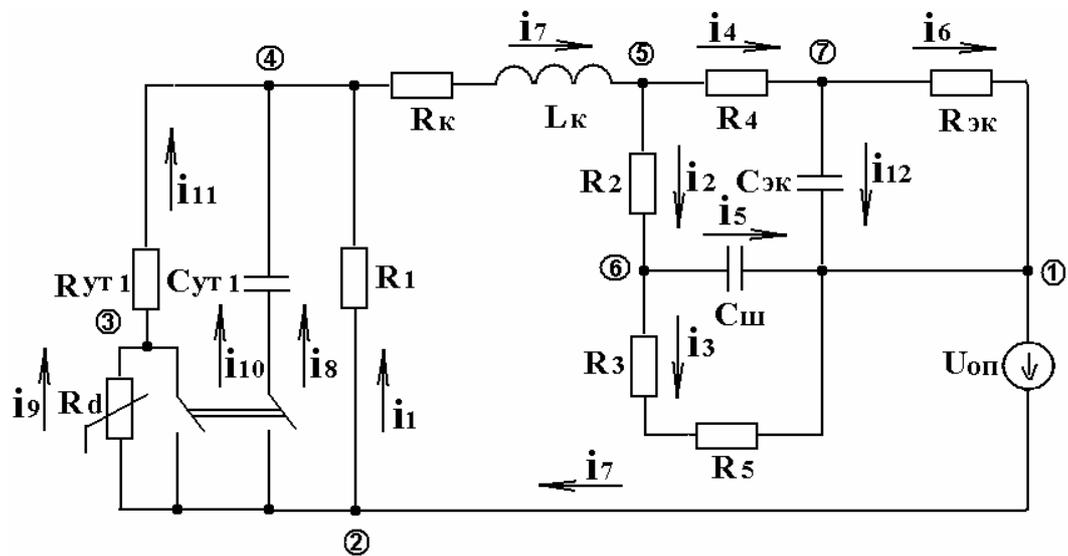


Рис. 4. Схема замещения ЭТК участка шахты с элементами цепи оперативного тока аппарата АЗУР-4. R_{YT} , C_{YT} – параметры кабеля, R_d – сопротивление дуги

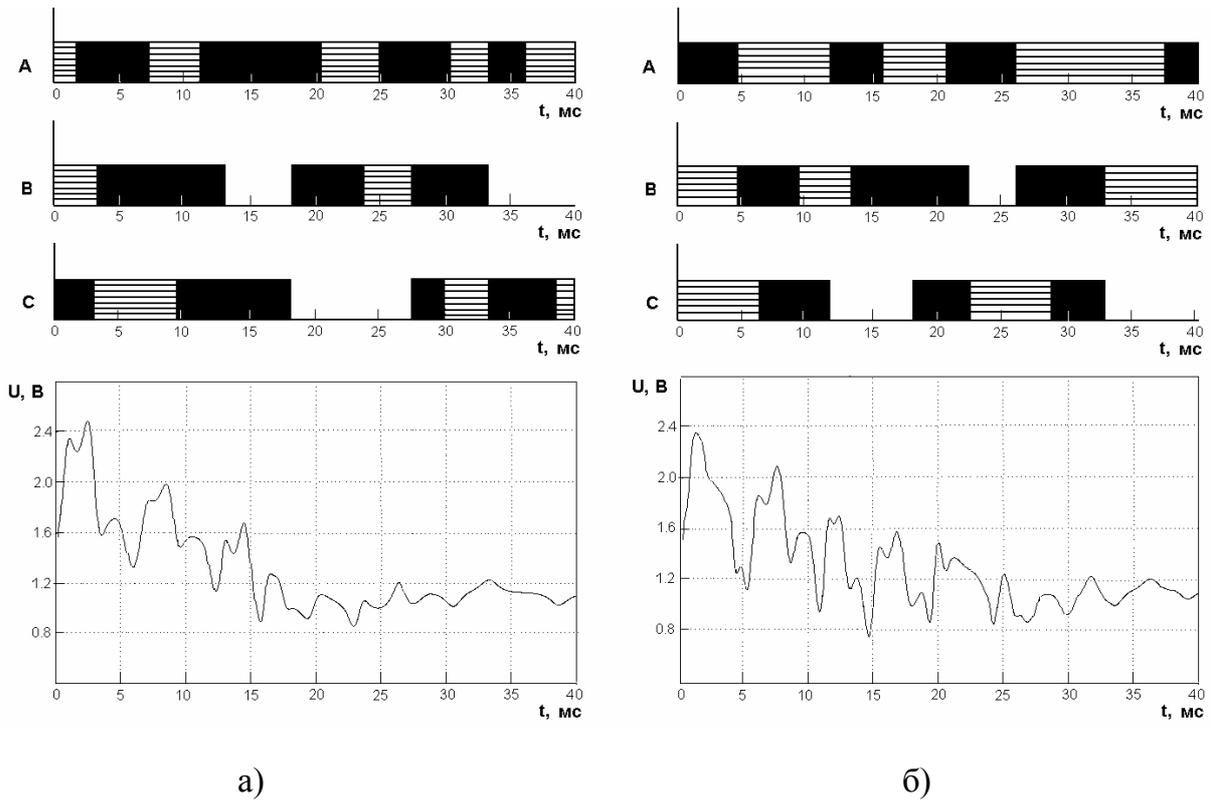


Рис.5. Процесс изменения амплитуды напряжения на резисторе R_5 , обусловленного разными состояниями электрических дуг в фазах контактора

Состояние дуги: -горение; - отсутствие; - замыкание контакта

Применительно к схеме замещения (рис. 4) могут быть определены параметры процесса и составлены уравнения по узлам и контурам.

$$\left. \begin{cases} i_6 + i_{12} - i_4 = 0; \\ i_7 - i_1 - i_8 - i_{11} = 0; \\ i_2 + i_4 - i_7 = 0; \\ i_3 + i_5 - i_2 = 0; \\ i_{11} + i_9 - i_{10} = 0; \\ i_{11} R_{VT} - U_{C8} + U_9 = 0; \\ i_1 R_1 - U_{C8} = 0; \\ i_7 R_k + L_k \frac{di_7}{dt} + i_2 R_2 + U_{CIII} = 0; \\ i_3 (R_3 + R_5) + U_{CIII} = 0; \\ i_4 R_4 + U_{C12} - U_{CIII} - i_2 R_2 = 0; \\ i_6 R_{ЭК} - U_{C12} = 0, \end{cases} \right\} \begin{array}{l} \text{— уравнения по узлам} \\ \text{— уравнения по контурам} \end{array} \quad (6)$$

$$U_{C8}(0_+) = 0; \quad U_{CIII}(0_+) = 0; \quad U_{C12}(0_+) = 0; \quad i_7(0_+) = 0,$$

где $i_8 = C_{ym1} \frac{du_{c8}}{dt}$; $U_5 = i_3 R_5$; $i_5 = C_{uu} \frac{du_{cIII}}{dt}$; $i_{12} = C_{ЭК} \frac{du_{c12}}{dt}$.

Вольт-амперная характеристика дуги представлена следующим уравнением [3]:

$$U_9(t) = \frac{P_0 I_0 (1 + 4\omega^2 \theta^2) \sin \omega(t_p + t)}{I_m (2\omega^2 \theta^2 + \sin^2 \omega(t_p + t) - \omega \theta \sin 2\omega(t_p + t))}, \quad (7)$$

где $\theta = t_0 / \sqrt{2}$; $P_0 I_0 = 4,85 \omega \theta \sqrt{2} I_0 U_{Г}$, t_p - время от момента предшествующего перехода тока через нуль до момента размыкания контакта; $U_{Г}$ - напряжение гашения дуги; t_0 - время от момента перехода через нуль тока и напряжения дуги до момента максимума (минимума) напряжения дуги; $t_{Г}$ - продолжительность горения дуги.

Результаты моделирования позволили получить диаграммы изменения напряжения на резисторе R_5 оперативной цепи АЗО (контролируемый параметр), обусловленного коммутационным переходным процессом, сопровождаемым горением дуги. В частности, на рис. 6 представлены два разных варианта (а; б) протекания переходного процесса, отличающихся друг от друга разными комбинациями состояний электрических дуг в фазах контактора при его отключении.

В результате исследования прослеживается закономерность изменения контролируемого параметра, обусловленного существованием электрической дуги на интервале переходного коммутационного процесса. Установлены кратковременные превышения напряжения на резисторе R_5 предельно допустимого значения для АЗО типа АЗУР-4, что способно привести к ложному срабатыванию защиты.

Обоснованный способ исследования позволяет установить характер протекания коммутационных процессов в электросети участка шахты при отключении кабельного ответвления с учётом влияния электрической дуги в контакторе пускателя.

Разработанная расчетная схема и методика исследований в дальнейшем могут быть применены для изучения закономерностей протекания подобных коммутационных процессов при варьировании параметров и конфигурации кабельной сети технологического участка шахты с учётом воздействия ЭДС вращения ранее включенных АД.

-
1. Анализ параметров процессов в шахтных электрических сетях./ Ф.П. Шкрабец, Н.А Шидловская., В.С Дзюбан., Е.А Вареник – Днепропетровск: НГУ. 2003. 151 с.
 2. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. – М.: Недра. 1982. 152 с.
 3. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. М.: Энергия.- 1973. 424 с.