

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г. Г. Костанян

О замыканиях на землю в цепи оперативного (постоянного) тока

(Представлено А. Г. Иосифяном 22 II 1947)

В опубликованных на сегодняшний день работах, посвященных цепям оперативного (постоянного) тока, вовсе не рассматривались переходные процессы, возникающие в момент повреждения изоляции цепи и указывалось, что ложное срабатывание реле в этих цепях возможно только при маловероятном нарушении изоляции относительно земли одновременно в двух точках цепи (^{1,2}).

В 1941 году впервые в литературе был описан единичный факт ложного срабатывания реле при замыкании на землю в одной точке цепи (³). В дальнейшем литература не пополнялась какими-либо теоретическими и экспериментальными исследованиями в этой области. Между тем, в результате замыкания на землю в одной точке цепи, в энергосистемах возникали аварии, иногда сопровождавшиеся нарушением энергоснабжения крупнейших потребителей.

Ниже даны некоторые наши исследования, посвященные переходным процессам, возникающим при замыкании на землю в одной точке цепи, как это представлено на рис. 1. На основании приведенных ниже математических выражений, определяющих эти переходные процессы, можно оценить каждую конкретную цепь оперативного тока с точки зрения возможности ложного срабатывания подключенных в ней реле.

Указанные на рис. 1 емкости C_1 и C_2 представляют из себя эквивалентные емкости отдельных полюсов цепи относительно земли, Γ_1 и Γ_2 — соответственно сопротивления изоляции полюсов, а γ , L , — омическое сопротивление и индуктивность реле P , за обмоткой которого возникло замыкание на землю.

Величины этих емкостей, омических сопротивлений и индуктивностей определяются параметрами подключенного к сети оборудования, состоянием изоляции цепи и т. п. и изменяются в широких пределах.

Следует иметь в виду, что даже при вполне исправном состоянии изоляции цепи (Γ_1 и Γ_2 несоизмеримо велики по сравнению с γ) замыкание на землю, изображенное на рис. 1, при известных обстоятельствах

может быть причиной ложного срабатывания реле Р, что вовсе не учитывается в литературе (^{3,4}). Возможность ложного срабатывания реле Р объясняется при этом внезапным изменением параметров цепи (в момент замыкания на землю), в результате чего изменяется напряжение между полюсами батарей и землей, что, как правило, приводит к дополнительному подзаряду емкости C_1 током i_1 , и разряду емкости C_2 током i_2 .

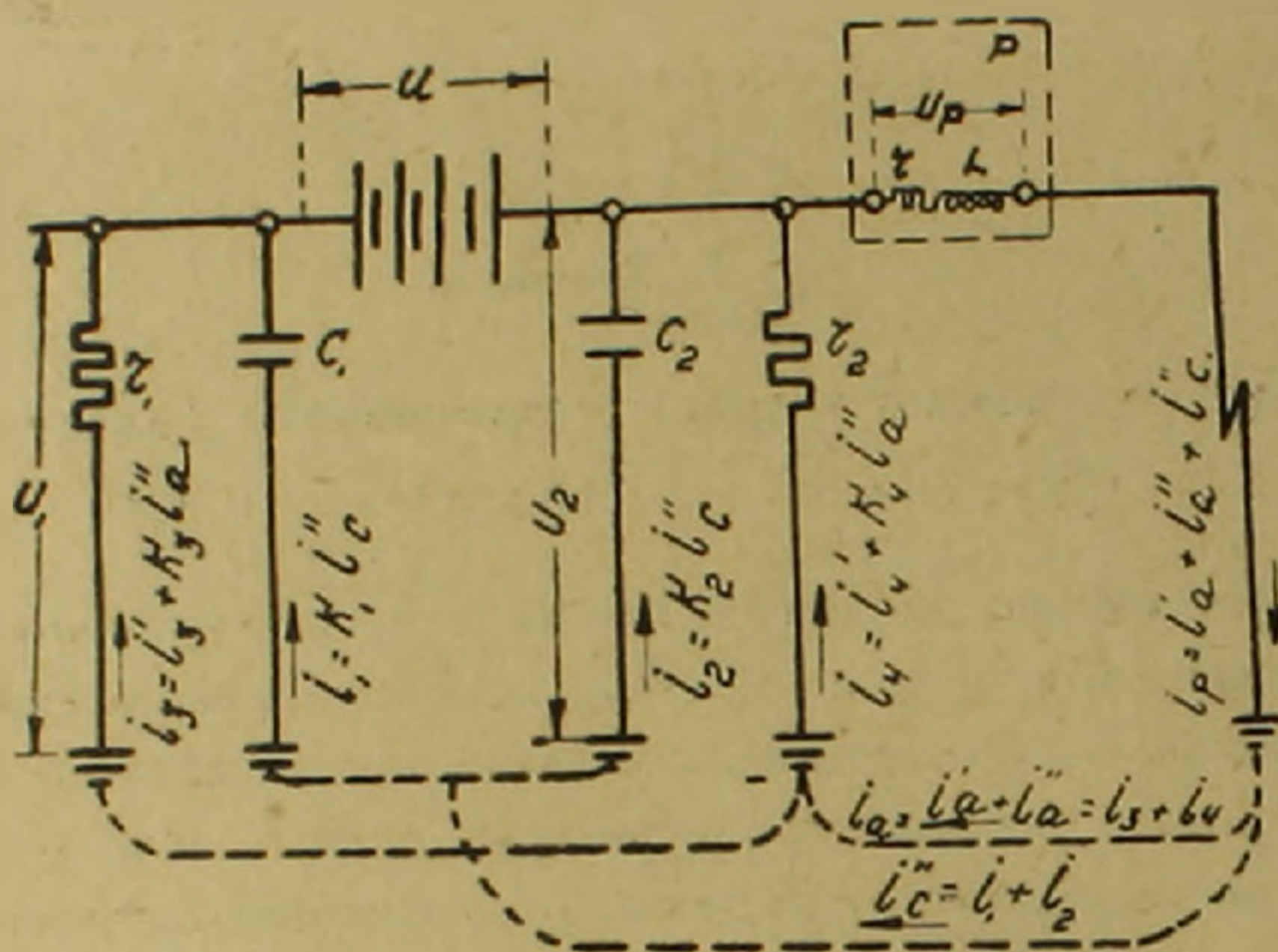


Рис. 1.

Эти токи $i_1 + i_2 = i_3$ находят путь через обмотку реле Р и как по величине, так и по времени могут оказаться достаточными для приведения его в действие.

Величина этих токов даже в данном частном случае зависит не только от величины $C_1 + C_2$, r и L , но и от соотношения между r_1 и r_2 , которое задает первоначальное (до замыкания на землю) распределение напряжений между полюсами батарей и землей, т. е. величину начального заряда емкостей C_1 и C_2 .

В общем случае, когда r_1 и r_2 соизмеримы с r , ток в реле Р (i_p) определяется всеми параметрами цепи, изображенными на рис 1, что в значительной степени затрудняет вычисление их величин (благодаря большому числу уравнений).

Переходный процесс в схеме рис. 1 определяется следующими уравнениями (считая, что схема рис. 1 представляет из себя цепь с сосредоточенными постоянными):

$$U = i_p r + L \frac{di_p}{dt} + r_1 i_3 = r_1 i_3 - r_2 i_4 = U_1(0) + U_2(0) = U_1 + U_2$$

$$U = U_1(0) + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt + U_2(0) - \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt$$

$$U_1(0) + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt = r_1 i_3; \quad U_1(0) = \frac{U r_1}{r_1 + r_2} \quad (1)$$

$$i_p = i_1 + i_2 + i_3 + i_4; \quad U_2(0) = \frac{U r_2}{r_1 + r_2},$$

где $U_1(0)$ и $U_2(0)$ — напряжение между полюсами батареи и землей в начальный момент переходных процессов.

Решая эти уравнения, мы находим

$$i_p = \frac{U}{r_1 L (c_1 + c_2)} \left[\frac{1}{\alpha \beta} - \frac{1}{\alpha - \beta} \left(\frac{e^{-\beta t}}{\beta} - \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha} \right) \right]$$

$$i_1 = \frac{U r_2 c_1}{r_1 L (c_1 + c_2) (\alpha - \beta)} \left(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t} \right)$$

$$i_2 = \frac{U r_2 c_2}{r_1 L (c_1 + c_2) (\alpha - \beta)} \left(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t} \right) \quad (2)$$

$$i_3 = \frac{U}{r_1 + r_2} \left(\frac{r_2}{r_1} \frac{r_3}{r_3 + r} + 1 \right) - \frac{U r_3^2}{r_1^2 (r + r_3) (\alpha - \beta)} (\alpha e^{-\beta t} - \beta e^{-\alpha t})$$

$$i_4 = \frac{U}{r_1 + r_2} \left(\frac{r_3}{r_3 + r} - 1 \right) - \frac{U r_3^2}{r_1 r_2 r + r_3) (\alpha - \beta)} (\alpha e^{-\beta t} - \beta e^{-\alpha t})$$

$$\alpha = m + \sqrt{m^2 - n}; \quad \beta = m - \sqrt{m^2 - n}; \quad r_3 = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$$

$$m = \frac{r}{2L} + \frac{1}{2r_3 (c_1 + c_2)}; \quad n = \frac{1}{L(c_1 + c_2)} \cdot \frac{r + r_3}{r_3}.$$

Исследуя уравнения (2) с учетом принятых на рис. 1 обозначений, получим, что ток рассматриваемой цепи состоит из:

1. независимых от времени составляющих

$$i'_p = i'_a = i'_3 + i'_4 = \frac{k_3 U}{r + r_3}$$

$$i'_3 = \frac{U}{r_1 + r_2} + k_3 i'_a; \quad i'_4 = -\frac{U}{r_1 + r_2} + k_4 i'_a \quad (3)$$

2. затухающих переходных токов

$$i''_c = i_1 + i_2 = \frac{k_3 U}{L(\alpha - \beta)} \left(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t} \right)$$

$$i''_a = -\frac{k_3 U}{(r + r_3)(\alpha + \beta)} \left(\alpha e^{-\beta t} - \beta e^{-\alpha t} \right), \quad (4)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{c_1}{c_1 + c_2}; \quad k_2 = \frac{c_2}{c_1 + c_2}; \quad k_3 = \frac{r_2}{r_1 + r_2}; \quad k_4 = \frac{r_1}{r_1 + r_2}$$

$$k_1 + k_2 = k_3 + k_4 = 1.$$

При этом

$$i_p = i'_p + i''_p = i'_a i''_a + i''_c = \frac{k_3 U}{r + r_3} +$$

$$+ \frac{k_3 U}{L(r + r_3)(\alpha - \beta)} \left[(r + r_3 - \alpha L) e^{-\beta t} - (r + r_3 - \beta L) e^{-\alpha t} \right].$$

Анализ выражений (2, 3, 4) показывает, что для нахождения полного тока i_p и затухающих составляющих токов в цепи схема рис. 1. может быть замещена схемой рис. 2.

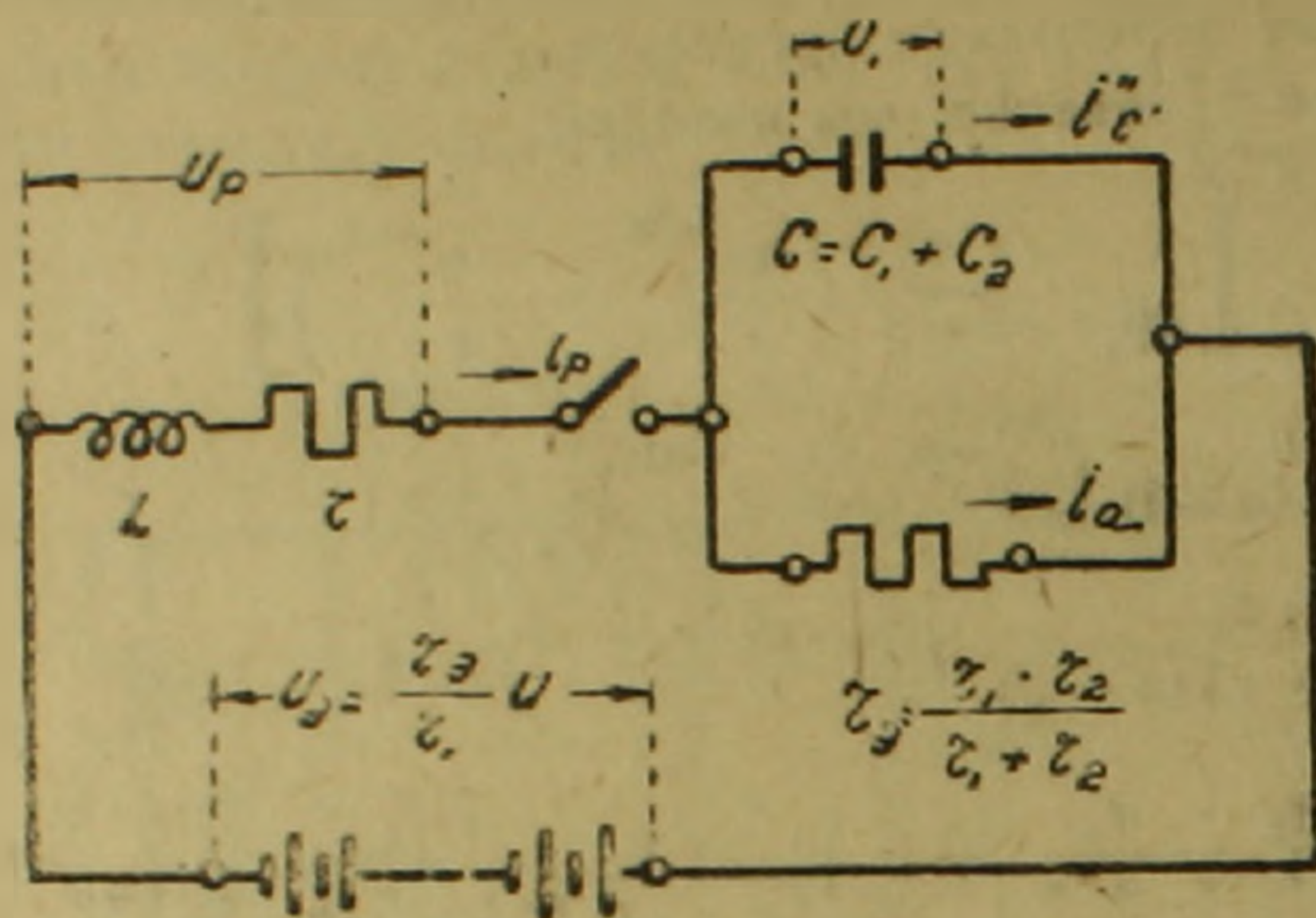


Рис. 2.

Такое замещение в рассматриваемом случае оказывается допустимым, так как в начальный момент процесса и в течение всего процесса

$U = U_1 + U_2$ и $\frac{i_1}{i_2} = \frac{C_1}{C_2}$, что непосредственно вытекает из основных уравнений, определяющих переходные процессы в схеме рис. 1.

В самом деле, решая эти уравнения (5), определяющие переходные процессы в схеме рис. 2, получим, что токи i_p , i_c'' , i_a'' в схеме рис. 2 в точности соответствуют тем-же токам в схеме рис. 1.

$$U_2 = \frac{U r_2}{r_1 + r_2} = i_p r + L \frac{di_p}{dt} + \frac{1}{C_1 + C_2} \int_0^t i_c dt$$

$$i_c r_2 = \frac{1}{C_1 + C_2} \int_0^t i_c dt; \quad i_p = i_c + i_a. \quad (5)$$

Следует иметь в виду, что на основании схемы замещения, изображенной на рис. 2 с учетом выражений (3, 4), упрощается нахождение не только токов реле, но и всех токов в ветвях схемы рис. 1, т.к. i_1 и i_2 могут быть найдены непосредственным умножением i_c'' на K_1 и K_2 , а токи i_3 и i_4 — путем сложения токов i_a K_3 и i_a K_4 с начальными токами $i_3(0) = \frac{U}{r_1 + r_2}$ и $i_4(0) = -\frac{U}{r_1 + r_2}$ с учетом принятых для этих токов на рис. 1 положительных направлений.

Любопытным является то обстоятельство, что схема 2, замещающая схему 1, не идентична последней не только в части схемы взаимного соединения элементов цепи, но и в части начальных зарядов емкости

(на рис. 1 C_1 имеют начальный заряд $q_1 = \frac{U r_1}{r_1 + r_2} C_1$, а C_2 соответственно

$q_2 = \frac{U r_2}{r_1 + r_2} C_2$, в то время, как на рис. 2 заряды емкостей $q_1 = q_2 = 0$).

Предлагаемая схема замещения дает возможность значительно упростить анализ рассматриваемых переходных процессов* и судить о влиянии отдельных параметров цепи на величину тока в реле.

В частности схема рис. 2 наглядно показывает, что ток в реле зависит от величины суммарной емкости цепи $C = C_1 + C_2$ и не зависит от соотношения между C_1 и C_2 , в то же самое время, даже при весьма надежном состоянии изоляции цепи (иногда ток утечки несоизмеримо мал по сравнению с током в реле) ток в реле зависит от соотношения между r_1 и r_2 , возрастаая при увеличении r_1 и сокращаясь при увеличении r_2 , даже при неизменном суммарном сопротивлении изоляции цепи

$$r_3 = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \text{const.}$$

Это дает основание считать, что для определения максимально возможного тока в реле при рассматриваемых замыканиях на землю следует учитывать максимально возможную емкость цепи, принимая $K_3 = 1$, что соответствует возможному в условиях эксплуатации состоянию изоляции цепей, когда r_2 весьма велико по сравнению с r_1 , однако, r_1 намного превосходит r .

Кроме того, приведенная на рис. 2 схема замещения дает возможность в некоторых случаях использовать общеизвестные из теории переменных токов выражения, определяющие переходные процессы в простейших цепях, содержащих R , L и C , имея в виду, что изменения тока в функции от времени соответствуют изменению напряжения, при-

ложенного к емкости C , т. е. $i_1 = \frac{U_1}{r_3}$.

В частности, когда величиной тока можно пренебречь (r_1 и r_2 несоизмеримо велики по сравнению с r), что имеет место при нормальном состоянии изоляции цепи (5), приведенная на рис. 2 схема упрощается, превращаясь в общеизвестную схему включения последовательно соединенных R , L и C на постоянную ЭДС.

В отличие от простейших цепей, где критический случай определяется однозначным решением уравнения, в рассматриваемом нами случае он выступает дважды, т. е. при непрерывном однозначном изменении C и постоянстве остальных параметров цепи апериодический процесс, перейдя в колебательный, может вновь приобрести апериодический характер, т. е. критический случай определяется уравнением:

* Предложенное выше замещение может быть использовано не только для анализов переходных процессов, но и для других исследований цепи (например, для анализа работы контролирующего изоляцию устройства).

Возможно, что путем изыскания новых схем замещения, подобных рассмотренным выше, удастся упростить некоторые расчеты в сложных электрических цепях.

$$\gamma = \frac{L}{r_0 (c_1 + c_2)} \pm 2 \sqrt{\frac{L}{c_1 + c_2}}.$$

Анализ выражения, определяющего ток в реле, показывает, что i_p достигает максимальной величины при $t = \frac{1}{2\sqrt{m^2 - n}} \ln \frac{Ln - \alpha(\gamma + r_0)}{Ln - \beta(\gamma + r_0)}$,

$$\text{составляя } i_{p \max} = \frac{U}{\gamma + r_0} \left(1 + \frac{\gamma + r_0 - \beta L}{\beta L} A^{-\frac{\alpha}{\alpha - \beta}} \right),$$

$$\text{где } A = \frac{\alpha(\gamma + r_0 - \beta L)}{\beta(\gamma + r_0 - \alpha L)}.$$

Реле Р в схеме рис. 1 не может сработать, если $i_{p \max} < i_{тр.}$ тока трогания в реле Р.

Наибольшую опасность для ложного срабатывания реле, представляет апериодический процесс в области, когда

$$\gamma < \frac{L}{r_0 (c_1 + c_2)} + 2 \sqrt{\frac{L}{c_1 + c_2}},$$

однако, в некоторых случаях и колебательный процесс при достаточно продолжительном периоде его колебания также может вызвать ложное срабатывание реле. Повышение напряжения до величины, превосходящей номинальное напряжение батареи, может возникнуть только при колебательном процессе.

Рассмотренные выше переходные процессы тем опаснее, чем выше номинальное напряжение батареи. Рост индуктивности обмотки реле и сокращение ее омического сопротивления способствуют повышению напряжения при колебательных процессах, которое, однако, не может превысить $2U$. Увеличение емкости $C_1 + C_2$ и сокращение γ облегчает возможность ложного срабатывания реле.

Возможность ложного срабатывания некоторых реле ХЭМЗ проверена нами экспериментально.

В частности, установлено, что в цепях оперативного тока 220 в представленное на рис. 1 повреждение изоляции в одной точке при емкости цепи превосходящей 3—4 μF может быть причиной ложного срабатывания реле типа ЭП—231, РП, РУ ХЭМЗ даже при вполне исправной изоляции остальной цепи ($i_s \cong 0$).

В цепях 110 в опасной для ложного срабатывания тех же реле оказывается емкость, превосходящая 7—12 μF .

Ереван, 1947, январь.

**Օպերատիվ (հաստատուն) հոսանքի շղթայում առաջ եկող
հողանցումների մասին**

Մինչև այժմ, ուղիների կեղծ աշխատանքը էլեկտրակայաններում և ենթակայաններում հնարավոր էր համարվում, միայն, օպերատիվ հոսանքի շղթայի ժամանակ 2 կետերում, հողի նկատմամբ մեկուսացման խախտման հազվագյուտ դեպքերում:

Իրականում ուղիների կեղծ աշխատանքը հնարավոր է նաև այն դեպքում, երբ անցումնային պրոցեսների հետևանքով շղթայի մեկուսացումը խախտվում է միայն մեկ կետում:

Մաթեմատիկական շատ պարզ հաշիվների միջոցով կարելի է գնահատական տալ առանձին վերցրած օպերատիվ հոսանքի ամեն մի շղթայի մասին, նրան միացված ուղիների հնարավոր կեղծ աշխատանքի տեսակետից:

Փորձնականորեն հաստատված է, որ 220 Վ օպերատիվ հոսանքի շղթայում մեկուսացման խախտումը մեկ կետում, երբ շղթայի պարունակությունը 3—4 միկրոֆարադից մեծ է, կարող է պատճառ դառնալ ՄՅՄՅ միջակա ուղիների կեղծ աշխատանքին:

G. H. Kostanian

On the Ground Faults in the DC Operative Circuits

Until recently, the false work of relays in the electric stations and substations has been considered possible in cases when ground insulation is broken in two points of the DC operative circuits. In reality, the false work of relays can also take place in such instances when the circuit insulation is affected in a point only as a result of transient processes.

It is possible by means of simple mathematical calculations to estimate each operative current circuit from the point of probable false work of relays joined to it.

It is experimentally confirmed that the affection in one point of insulation in a 220 v operative current, when the capacity of the latter is greater than 3—4 MF, may account for the false work of relays made by the Kharkov Electro-mechanical factory.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. И. В. Лиманов. Эл. ст., № 5; стр. 315, 1930.
2. В. Н. Немолякин. Эл. ст., № 6, стр. 147, 1931.
3. В. С. Кондахчян. Эл. ст., № 13—14, стр. 38, 1941.
4. Сборн. противоавар. цирк., стр. 21, 1942.
5. ОРГРЭС Инфор. письмо № 82216, 1944.