

Г. Г. Костанян

Резонансные явления в цепях оперативного (постоянного) тока

(Представлено А. Г. Иосифяном 3 X 1946)

Система постоянного тока, применяемого на электрических станциях и подстанциях для целей сигнализации и управления в схемах релейной защиты и автоматики, часто объединяет десятки и сотни километров жил контрольного кабеля и сотни электромагнитных механизмов (реле, приборы сигнализации, включающие и отключающие катушки и т. п.). Благодаря значительной емкости этих цепей (протяженность контрольных кабелей) и их индуктивности (обмотки электромагнитных механизмов), возникающие в рассматриваемых цепях электрические явления могут быть причиной аварий (^{1,2}). При этом значительную опасность представляют резонансные явления, возникающие при попадании заземленного источника переменного тока промышленной частоты (50 пер/сек) в цепь постоянного, поскольку эти резонансные явления могут быть причиной ложного срабатывания электромагнитных механизмов и повреждения изоляции цепи. Возможность попадания переменного тока в цепь постоянного объясняется близостью расположения их цепей на электрических станциях и подстанциях (подход к общим клеммным сборкам, блокшайбам, реле и т. п.).

Опасность возникающих при этом резонансных явлений объясняется значительной индуктивностью обмоток электромагнитных механизмов по сравнению с омическим их сопротивлением и наличием в цепи емкости, способной компенсировать их индуктивность.

Впервые в 1940 году мы описали аварию, возникшую из-за ложного срабатывания реле типа РП-2 ХЭМЗ при резонансных явлениях в цепи(³). Впоследствии подобные аварии отмечались в системе Ленэнерго (⁴). Однако, вся литература, посвященная этому вопросу, ограничивается описанием отдельных аварийных случаев, и представляет из себя отдельные разрозненные высказывания, не подтвержденные исследованиями. В частности, эта литература вовсе не отмечает возможности повышения напряжения в цепи. Учитывая это, ниже приведены некоторые наши теоретические и экспериментальные исследования в области указанных резонансных явлений.

При непосредственном попадании заземленного источника переменного тока в цепь постоянного, резонансные явления ограничиваются одиночными контурами, а при его попадании через обмотку прибора, обладающего индуктивностью, резонансные явления могут возникнуть в связанных контурах.

На рис. 1-а представлен один из возможных одиночных контуров в цепи, в котором индуктивность обмотки реле P компенсируется емкостью относительно земли подключенного в обмотке реле индивидуального кабеля. На рис. 1-б и 1-в показана схема эквивалентных сопро-

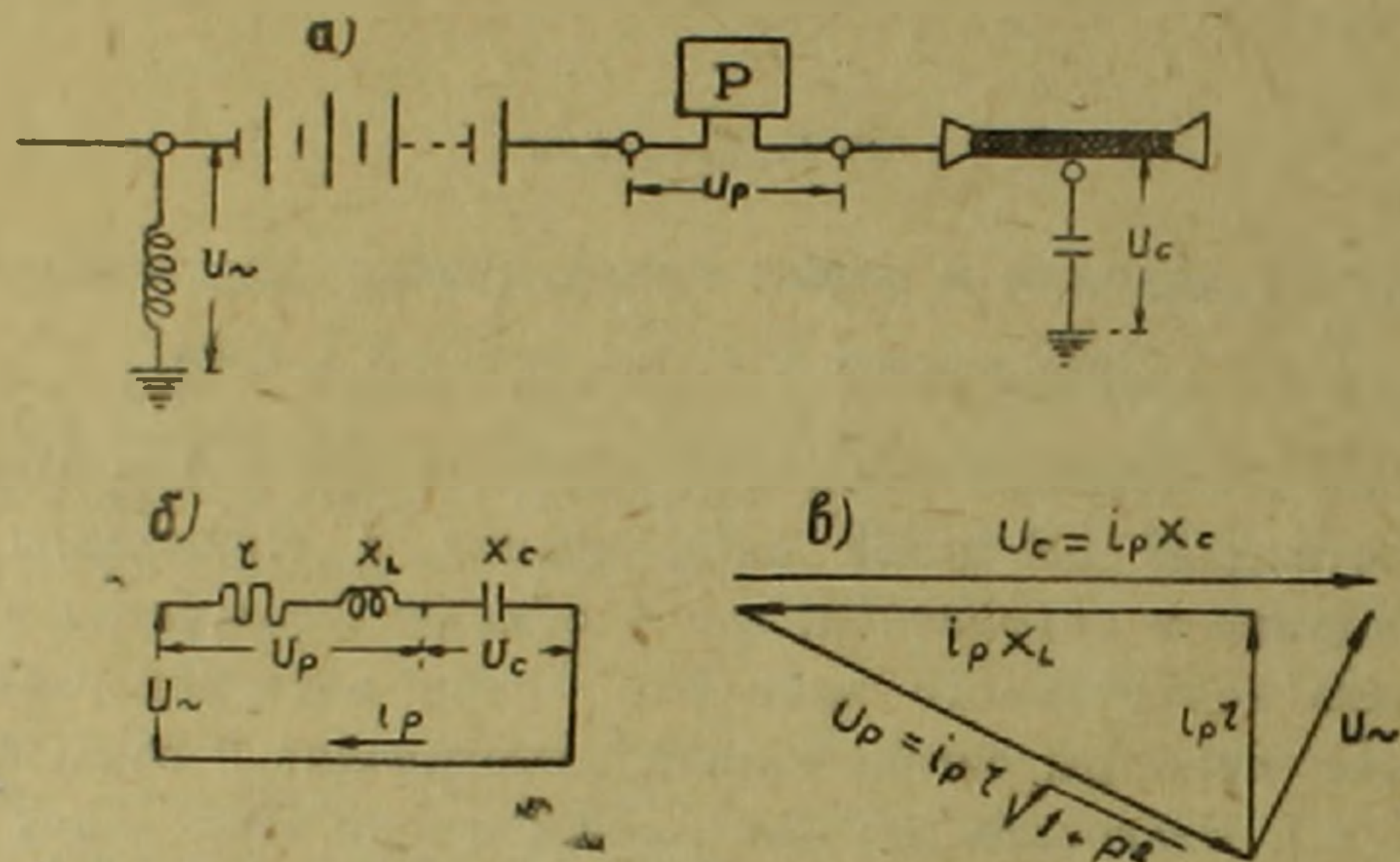


Рис. 1

тивлений такого контура и векторная диаграмма возникающих в контуре напряжений. Следует иметь в виду, что, наряду с указанным на рис. 1-а одиночным контуром, переменный ток может найти путь в других ветвях цепи, создавая в каждой ветви отдельный одиночный контур на подобие изображенного на рис. 1-а.

На рис. 2-а представлен связанный контур, в первичной цепи которого индуктивность прибора компенсируется суммарной емкостью

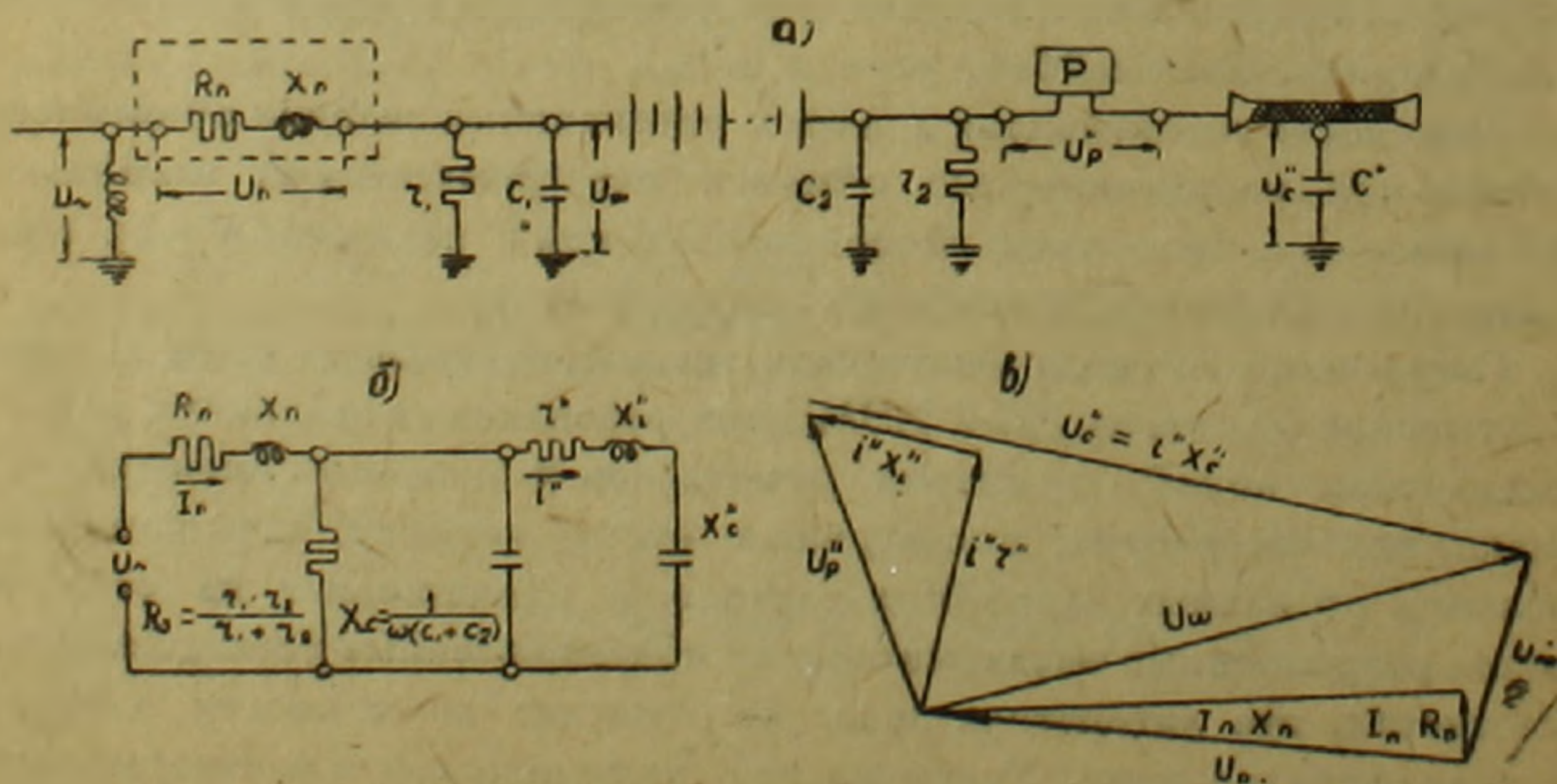


Рис. 2

всей сети постоянного тока, создавая повышенное напряжение между шинами батареи и землей— $U_{ш}$. Это напряжение $U_{ш}$ приложено ко вторичной цепи контура, в котором индуктивность обмотки реле компенсируется емкостью кабеля индивидуальной ветви. На рис. 2-б и 2-в показаны эквивалентная схема сопротивления и векторная диаграмма напряжений связанного контура.

В таблице ниже приведены выражения, на основании которых могут быть определены максимально возможные значения токов и напряжений в одиночных и связанных контурах при условии полной компенсации реактивных напряжений:

Характер связи перемен. тока с постоянным	В соответствии с рис. 1	В соответствии с рис. 2	
		В первичной цепи контура	Во вторичной цепи контура
Наим. напря- жений и токов			
Напряжение между цепью постоянного тока и землей	$U_{с\max} = U_{\sim} \rho$	$U_{п\max} = U_{\sim} \rho_1$	$U''_{с\max} = U_{\sim} \rho_1 \rho_2$
Напряжение на клеммах реле	$U_{\rho\max} = U_{\sim} \sqrt{1+\rho^2}$	$U_{п\max} = U_{\sim} \rho_1 \sqrt{\frac{X_0^2+R_0^2}{Z_0}}$	$U''_{\rho\max} = U_{\sim} \rho_1 \sqrt{1+\rho_2^2}$
Ток в реле	$i_{\rho\max} = \frac{U_{\sim}}{r}$	$i_{п\max} = \rho_1 \frac{U_{\sim}}{Z_0}$	$i''_{\rho\max} = \rho_1 \frac{U_{\sim}}{r''}$

где $\rho = \frac{X_L}{r}$; $\rho_1 = \frac{Z_0}{R_0 + R_0}$; $\rho_2 = \frac{X_L''}{r''}$

$R = \frac{r'' R_0}{r'' + R_0}$; $R_0 = \frac{X_c^2 R}{X_c^2 + R^2}$; $Z_0 = \frac{X_c R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$

(остальные обозначения показаны на чертеже).

Величины Z_0 и R_0 имеют определенный физический смысл, представляя эквивалентные сопротивления всей цепи постоянного тока, приведенные к шинам батареи и могут быть определены замерами с помощью простейших приборов ⁽³⁾.

Ниже приведены выражения, которые дают возможность оценить каждую индивидуальную ветвь цепи постоянного тока, с точки зрения опасности возникновения в ней резонансных явлений, при непосредственном попадании переменного тока в цепь постоянного.

1. Возможность ложной работы реле исключается, если:

$$X_L - X_c > \sqrt{\left(\frac{U_{\sim}}{i_{тр\sim}}\right)^2 - r^2} \tag{1}$$

2. Возможность пробоя изоляции реле исключается, если:

$$X_L - X_c > \sqrt{\left(\frac{U_{\sim}}{U_{др}} Z_p\right)^2 - r^2} \tag{2}$$

3. Возможность пробоя изоляции цепи на землю исключается, если:

$$X_L - X_c > \sqrt{\left(\frac{U_{\sim}}{U_{\text{дк}}} X_c\right)^2 - r^2}, \quad (3)$$

где $i_{\text{тр}}$ — ток трогания реле

$$i_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{тр}}}{Z_p} = \frac{\text{напр. трогания реле при перем. токе,}}{\text{импеданс обмотки реле}}$$

$U_{\text{др}}$ — допустимое напряжение обмотки реле по состоянию ее изоляции,

$U_{\text{дк}}$ — напряжение, допустимое по состоянию изоляции цепи относительно земли

(остальные обозначения см. рис. 1 и 2).

В опасных случаях r мало по сравнению с реактивными сопротивлениями контура и, как правило, $i_{\text{тр}} Z_p < U_{\text{др}}$, поэтому цепь не представляет опасности, если:

$$U_{\text{тр}} > \frac{U_{\sim} X_L}{X_L - X_c} \quad \text{и} \quad U_{\text{дк}} > \frac{U_{\sim} X_L}{X_L - X_c}$$

Для предварительной оценки цепей следует иметь в виду, что если: $X_c \geq 2X_L$, то всегда $U_c < 2U_{\sim}$ и $U_p < U_{\sim}$, т. е. цепь не представляет опасности с точки зрения резонансных явлений.

На основании произведенных нами замеров установлено, что при переменном токе 50 н/сек индуктивное сопротивление X_L обмоток некоторых реле ХЭМЗ достигает и превосходит десятки тысяч ом и оказывается вполне соизмеримым с емкостным сопротивлением X_c прокладываемых в сети кабелей.

Поэтому описанные резонансные явления могут представлять реальную опасность для некоторых реле ХЭМЗ, в частности для реле типа ЭП-231 ($r \cong 25 \div 35$) и РП-2 ($r \cong 4 \div 6$), которые весьма часто используются в схемах релейной защиты.

Результаты эксплуатации подтверждают опасность рассмотренных выше резонансных явлений.

В процессе эксплуатационных проверок, нами установлено, что в одиночном контуре, состоящем из 220 вольтных обмотки реле типа ЭП-231 ХЭМЗ и емкости порядка 100 метров одножильного кабеля, переменный ток 50 н/сек напряжением 220 вольт вызывает срабатывание реле и пробой его обмотки.

В связанных контурах напряжение между шинами батареи и землей (т. е. в цепи первичного контура) может практически достигать нескольких тысяч вольт, а токи и напряжения в цепи вторичного контура могут многократно превосходить предельные напряжения и токи в одиночных контурах.

Возникающие при этом напряжения между шинами батареи и землей, могут представлять опасность не только для значительного коли-

чества оборудования цепи, но и в некоторых случаях для жизни обслуживающего установку персонала.

Возможность возникновения опасных резонансных явлений в рассматриваемых цепях может быть исключена путем шунтирования обмоток реле омическим сопротивлением (для расстройки резонансного контура в цепях, не удовлетворяющих условия 1—3) и путем установки разрядника типа РА-350 между шинами батареи и землей.

Ереван, 1946, сентябрь.

Գ. Գ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

Ռեզոնանսային երեւոյթները օպերացիոյ (նաստատու) հասանքի օղակներում

1. Արդյունաբերական հաճախականութիւնը, ինչպէս և այլ հաճախականութիւնը ունեցող փոփոխական հոսանքի մուտքը հաստատուն հոսանքի շղթան՝ կարող է առաջացնել լարման ռեզոնանսի երեւոյթ, ի հաշիվ ունենալով ինդուկտիւ ղիմադրութեան և կաքելներէ պարունակային ղիմադրութեան կոմպենսացիայի: Այդ դեպքում հնարավոր է ունենալ կեղծ աշխատանք և զգալի լարումների առաջացում, որոնք ընդունակ են վնասելու շղթայի մեկուսացմանը:

2. Ռեզոնանսային երեւոյթները կարող են առաջանալ ինչպէս առանձնակի փակ շղթաներում (կոնտուրներում, երբ փոփոխական հոսանքն անմիջապէս մուտք է գործում հաստատուն հոսանքի շղթան՝ համապատասխան $M = 1$ նկարի), այնպէս և կապակցված փակ շղթաներում (երբ փոփոխական հոսանքը մուտք է գործում հաստատուն հոսանքի շղթան, անցնելով ինդուկտիւ ղիմադրութիւնը ունեցող սարքավորման փաթեթով):

G. G. Kostantian

Resonance Phenomenon in Operating (direct) Current Circuits

Alternating current of industrial or other frequencies when penetrating into direct current circuit causes the phenomenon of series resonance between relays inductance and cable capacitance. Thus is possible a false action of relays and appearance of considerable tensions that can destroy the circuit insulation.

Resonance phenomenon can appear not only in unit circuits (by immediate penetration of alternating current into the direct current circuit in accordance with fig. 1) but in connected circuits too (by penetration of alternating current through the apparatus coil having inductance).

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Л. Магилевкин. „Электрические станции“, № 13—14, 1941. 2. Г. Г. Костанян. „Электрические станции“, № 7, 1940. 3. П. Л. Калантаров. „Теория переменных токов“, Госэнергоиздат, 1940.