

ДО АНАЛІЗУ ФАКТОРІВ УРАЖЕННЯ ЛЮДИНИ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ В ДІЛЬНИЧНІЙ ШАХТНІЙ МЕРЕЖІ

Чорноус Є.В., Сорочка Л.О.

Донецький національний технічний університет

emitoe@yandex.ru

Гранично допустимі значення струму через тіло людини в залежності від його тривалості та напруги дотику при $f = 50$ Гц регламентуються ГОСТ 12.1.038–82 [3]. Проте ряд авторів вважають, що основоположний стандарт, що дозволяє обґрунтовано підходити до нормування допустимих струмів через тіло людини, в даний час відсутній [1,2]. Обумовлено це тим, що існують реальні ситуації, коли струм через тіло людини може суттєво змінюватись. Особливо це характерно для шахтних низьковольтних мереж, де розвиток аварійної ситуації при попаданні людини під напругу складається з кількох етапів [1,4,5].

Тривалість першого етапу, що визначається часом спрацювання системи захисного відключення, складає не більше 0.2 с. Він характеризується інтенсивним перехідним процесом, при якому перший кидок струму може перевищити 0.5 А. В усталеному режимі працює компенсуючий пристрій, який знижує струм через тіло людини в декілька разів.

На другому етапі, коли мережа живиться електродвигунами в стані їх вільного вибігу, компенсація порушується внаслідок зниження частоти генерованої ЕРС. Це призводить до збільшення струму витoku (струму через тіло людини). Тривалість етапу визначається моментом відключення контакторів внаслідок зменшення напруги. Вона залежить від потужності електродвигунів, інтенсивності їх гальмування і знаходиться в межах 0.2...0.3 с¹. Крім того, початкова стадія 2-го етапу також характеризується інтенсивним перехідним процесом.

Третій етап починається моментом відключення контакторів споживачів дільниці. При цьому в 3...4 рази зменшується довжина та ємність кабелів, компенсація повністю відсутня, напруга продовжує падати.

Загальна тривалість трьох етапів складає від 0.9 до 1.1 с. [1,4,5].

Очевидно, що для оцінки тяжкості ураження людини в описаній триетапній ситуації необхідно застосувати узагальнений інтегральний критерій, що враховував би вплив всіх указаних факторів. В якості такого критерію можна застосувати еквівалентне (середньоквадратичне за час дії t_0) значення струму I_e :

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} i^2 dt}, \quad (1)$$

Цей показник враховує вплив всіх етапів аварійної ситуації а також перехідні процеси між ними. Крім того, значення критерію можна порівнювати з даними діючого ГОСТ 12.1.038–82.

В якості інтегрального критерію ряд авторів пропонують прийняти кількість електромагнітної енергії Q , поглинутої людиною за час дії струму [1,2]. Такий енергетичний критерій пов'язаний з опором тіла людини R та еквівалентним струмом співвідношенням:

$$Q = \frac{R}{t_0} \int_0^{t_0} i^2 dt = I_e^2 \cdot R \cdot t_0. \quad (2)$$

Цей критерій, як оцінка ступеню враження людини електричним струмом, міг би бути важливим і об'єктивним показником в тому разі, коли б в наявності була інформація про реальний електричний опір тіла людини. Останній же може мінятись навіть в межах одного етапу. Крім того, виникає питання про кількість поглинутої енергії, яку можна вважати безпечною для життя та здоров'я людини.

Дане дослідження має ціллю визначення фактичних значень еквівалентного струму та енергетичного критерію (ЕК) для трьох етапів аварійної ситуації в шахтній дільничній мережі (рис. 1).

Методика дослідження базується на математичному моделюванні етапів аварійної ситуації, визначенні миттєвого значення струму витoku (струму через тіло людини) $i(t)$, текучих значень еквівалентного струму $I_e(t)$ і кількості поглинутої енергії $Q(t)$ за умови незмінного опору людини $R = 1000$ Ом.

Схема рис. 1 а) в динаміці описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} 3 \cdot C_0 \frac{du_{FA}}{dt} - i_{JK} = 3 \cdot C_0 \frac{de_A}{dt}; \\ i_{JK} + 3 \cdot C \frac{du_A}{dt} + u_A (1/R + 3/R_H) = 3 \cdot C \frac{de_A}{dt} + 3 \cdot e_A/R_H; \\ L_{JK} \frac{di_{JK}}{dt} + R_{JK} i_{JK} - u_A + u_F = 0, \end{cases} \quad (3)$$

¹ В даному дослідженні тривалість 2-го етапу взята 0,25 с.

де i_L, u_A, u_{FA} – миттєві значення змінних стану (струм компенсуючого дросселя, напруга фази А кабелю, напруга фази А ФНП);

L_D, R_D – індуктивність та активний опір компенсуючого дросселя;

C, R – ємність та активний опір (фаза – земля) силового кабелю;

$e_A = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$ – миттєве значення ЕРС фази А джерела живлення;

ψ – початкова фаза, що визначає момент комутації.

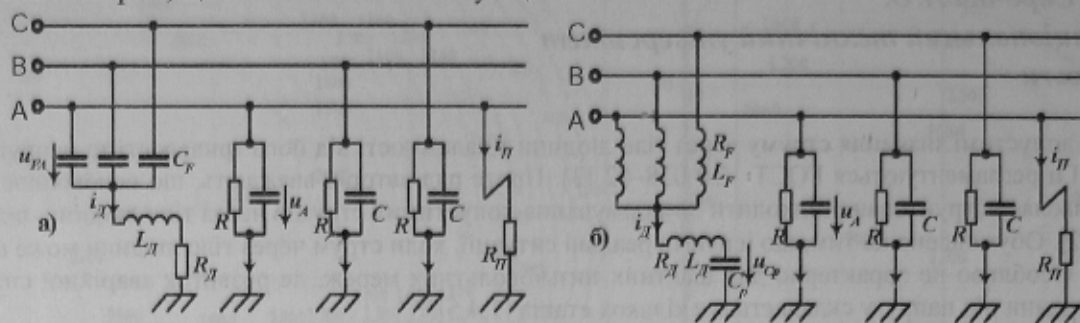


Рисунок 1 – Схеми компенсації смісної складової струму витoku з смісним (а) та індуктивним (б) фільтрами нульової послідовності

Аналогічно для схеми рис. 1 б):

$$\begin{cases} di_L/dt = (-3e_A - (3R_D + R_F) i_L + 3u_A - 3u_{CF}) / (3L_D + L_F); \\ du_A/dt = (3 \cdot de_A/dt \cdot C + 3e_A/R_M - i_L - u_A(1/R + 3/R_M)) / (3C); \\ du_{CF}/dt = i_L/C_F, \end{cases} \quad (4)$$

де u_{CF} – миттєве значення напруги на розділюючій ємності C_F .

Звичайно при дослідженнях, пов'язаних з безпекою людини, враховують найбільш несприятливі умови. В даній задачі це будуть умови, коли в момент виникнення аварійної ситуації працюють найбільш потужні двигуни дільниці, а малопотужні відключені. Прийняті припущення:

1. ЕРС статора синусоїдна, її амплітуда пропорційна магнітному потоку і частоті обертання ротора.
2. Електричне коло ротора еквівалентного генератора є інерційною ланкою першого порядку, інтенсивність затухання потоку якого характеризується постійною часу T_E .
3. Закон зміни частоти обертання ротора в стані вільного вибігу є лінійним і визначається механічною постійною часу T_M , яка дорівнює середньому часу вибігу.

В цих умовах еквівалентну ЕРС двигунів в стані вільного вибігу (другий та третій етапи) можна моделювати співвідношенням:

$$e_A(t) = k_e \cdot \sqrt{2/3} \cdot U \cdot (1 - s_n) \cdot (1 - t/T_M) \cdot \exp(-t/T_E) \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot \left(t - 0.5 \cdot t^2/T_M\right)\right) \quad (5)$$

де $k_e = 0.9 \dots 0.95$ – коефіцієнт, що враховує відношення початкового значення ЕРС двигуна до напруги мережі U ;

ω_0 – синхронна частота обертання ротора;

s_n – початкове (номінальне) ковзання двигуна в момент відключення мережі;

T_E, T_M – електромагнітна та механічна постійні часу двигуна в режимі вільного вибігу.

Дослідження проводилось безпосереднім інтегруванням систем (3) і (4) для першого етапу, та чисельним інтегруванням (метод Рунге-Кутта) на другому та третьому етапах. Остатнє обумовлено нелінійним співвідношенням (5). Миттєве значення струму витoku визначалось відношенням напруги фази А до опору людини, а його еквівалентне значення співвідношенням (1). Текуче та кінцеве значення поглинутої енергії визначалось співвідношенням (2).

На рис. 2 приведена одна з осцилограм чисельного експерименту для дільничної мережі при $U = 660$ В, $C = 0.75$ мкФ і некерованою індуктивністю, що забезпечує майже повну компенсацію на першому етапі. Оскільки значення індуктивності не змінюється, на другому етапі ($0,2 < t < 0,45$ с) умови компенсації порушуються. На осцилограмі це відзначається різким зростанням миттєвого струму $i(t)$, та кількості поглинутої енергії $Q(t)$. Спостерігаються також підйоми кривої $Q(t)$ при першій та другій комутаціях обумовлені перехідними процесами. Відзначимо також, що по мірі зменшення струму витoku його еквівалентне значення також знижується, в той час як кількість поглинутої енергії може тільки зростати.

Узагальнені результати дослідження залежності кількості поглинутої енергії від індуктивності компенсуючого дросселя приведені на рис. 3. При цьому розглядались схеми з різними фільтрами нульової послідовності (ФНП) і два режими компенсації:

- в схемі з некерованим дроселем його індуктивність постійна на першому і другому етапах (величина L_0 є резонансною для першого етапу);

- в схемі з керованим дроселем його індуктивність на першому етапі дорівнює резонансному значенню L_0 , а на другому етапі її значення є аргументом дослідження.

При аналізі результатів дослідження, частина з яких приведена на рис. 3, було встановлено:

1. В схемі з некерованим дроселем оптимальне по енергетичному показнику значення індуктивності знаходиться в межах 1.1... 1.15 по відношенню до резонансного L_0 .
2. В схемі з керованим дроселем оптимальне значення індуктивності на другому етапі знаходиться в межах (1.25... 1.35) L_0 .
3. Застосування керованої індуктивності дозволяє в 1.4... 1.6 разів зменшити кількість поглинутої енергії.
4. По кількості поглинутої енергії при рівних умовах схема з ємнісним ФНП є більш сприятливою.
5. Складова поглинутої енергії, обумовлена перехідними процесами, практично не залежить від схеми або режиму компенсації і для вказаних вище базових параметрів складає ≈ 0.5 Дж.

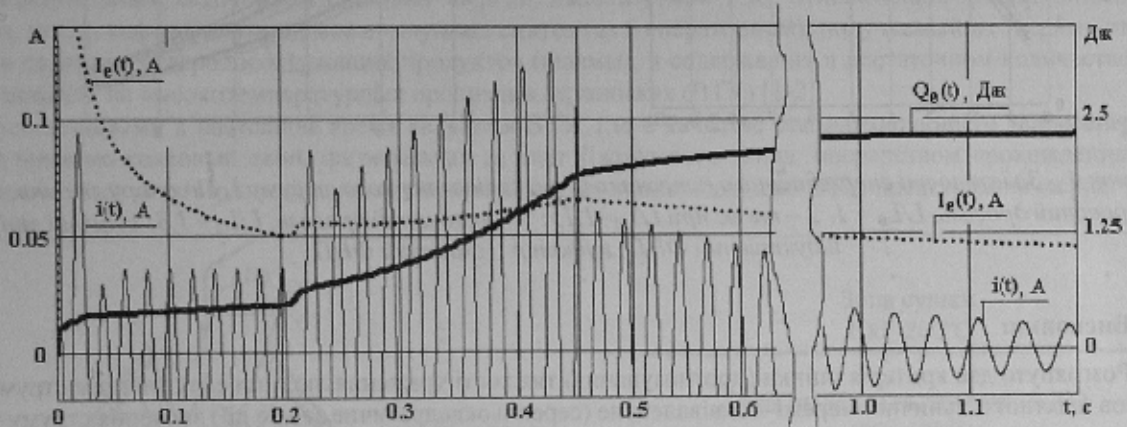


Рисунок 2 – Розрахункові осцилограми $i(t)$, $Q_e(t)$, $I_e(t)$, $q(t)$ для базових значень параметрів ($U = 660$ В, $C = 0.75$ мкФ, $R = 100$ кОм) та некерованого дроселя $L/L_0 = 1$

В усіх дослідах незалежно від параметрів мережі, її напруги та режиму компенсації спостерігалась однозначна відповідність між кількістю поглинутої енергії та еквівалентним значенням струму. Здавалось, що обидва показники рівноцінні. Однак, це виявилось справедливим тільки за умови, що опір тіла людини незмінний на протязі всієї аварійної ситуації.

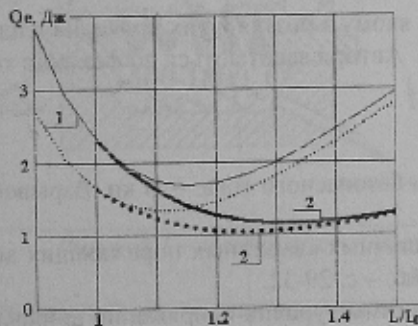


Рисунок 3 – Залежності поглинутої людиною енергії від індуктивності дроселя:

1 – некерований дросель; 2 – керований дросель; суцільні лінії – індуктивний ФНП; пунктир – ємнісний ФНП

На рис. 4 приведені залежності енергетичного показника Q та еквівалентного струму I_e від опору людини, де виявляються очевидні розходження в оцінці рівня небезпеки. Сутність розходження полягає в тому, що при збільшенні опору людини еквівалентне значення струму знижується, в той час як кількість поглинутої енергії збільшується. Ця особливість спостерігається при обох схемах ФНП і на всіх режимах компенсації.

Природно, що виникає питання, чим пояснити таку особливість поведінки двох критеріїв? Найбільш просте і очевидне пояснення можна запропонувати наступне. Шахтна дільнична мережа по відношенню до людини повинна розглядатися як незалежне джерело енергії, внутрішній опір якого штучно завищений паралельним резонансним контуром, що складається з ємності мережі та компенсуючого дроселя. Але відомо, що коли внутрішній опір джерела енергії перевищує опір навантаження (в нашому випадку опір тіла людини), то робоча точка джерела на його зовнішній характеристиці знаходиться нижче половини номінальної фазної напруги.² Якраз для цієї умови роботи джерела енергії збільшення опору навантаження призводить до зменшення струму, але до збільшення споживаної енергії.

Виникає нове питання: якому з розглянутих критеріїв віддати перевагу при оцінці тяжкості ураження людини? З одного боку заниження опору людини приводить до завищення еквівалентного струму i , таким чи-

² Це значення напруги відповідає визначенню "напруга дотику".

ном, створює деякий "резерв" безпеки. З іншого боку це може привести до зниження поглинутої енергії, внаслідок чого рівень небезпеки для людини може враховуватись не в повній мірі. Ці результати (рис. 4) не дозволяють однозначно відповісти на питання, який з двох розглянутих показників є "більш об'єктивним", якщо мова йде про конкретну людину, опір якої невідомий і, крім того, може змінюватись в широких межах.

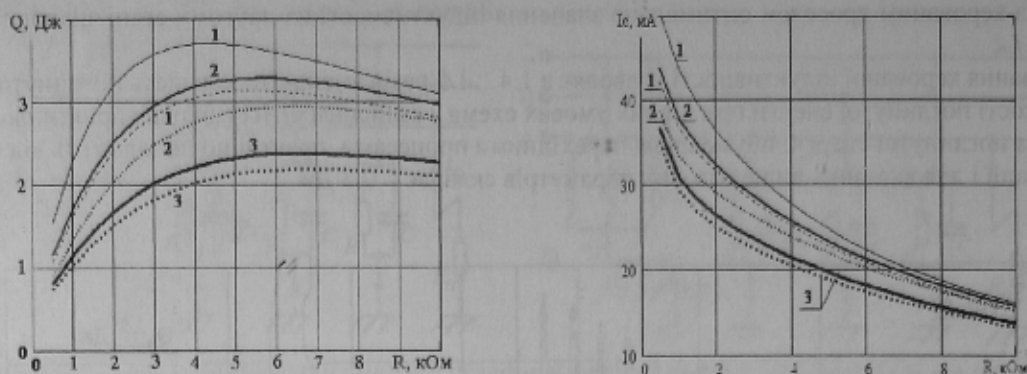


Рисунок 4 – Залежності енергетичного показника Q та еквівалентного струму I_e від опору людини: 1 – некерований дросель, $L/L_0=1$, 2 – те ж при $L/L_0=1,15$; 3 – керований дросель, $L/L_0=1,3$; суцільні лінії – індуктивний ФНП; пунктир – змішаний ФНП

Висновки:

1. Розглянуто два критерія оцінки (прогнозування) тяжкості ураження людини електричним струмом стосовно умов шахтної дільничної мережі – еквівалентне (середньоквадратичне за час дії) значення струму та кількість поглинутої тілом людини за час дії струму електромагнітної енергії.

2. Розроблені математичні моделі для визначення кількісних значень обох критеріїв, в яких враховуються три етапи аварійної ситуації, параметри мережі, режим компенсації та перехідні режими при зміні етапів.

3. Дослідження математичних моделей показало, що обидва критерії оцінки в залежності від параметрів мережі, її напруги, режиму компенсації та особливостей перехідних процесів рівноцінні і знаходяться в однозначній відповідності до тих пір, поки опір людини можна вважати постійним.

4. При зростанні опору тіла людини вище загальноприйнятого значення 1000 Ом розглянуті критерії дають протилежні результати (зниження еквівалентного струму, але зростання поглинутої електромагнітної енергії) незалежно від параметрів мережі чи режиму компенсації.

Останній з висновків не дозволяє дати однозначну відповідь: якому з розглянутих критеріїв слід віддати перевагу при оцінці рівня небезпеки для людини конкретної мережі. Автори звертаються до фахівців та зацікавлених осіб з проханням висловити свої міркування з цього приводу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюбан В.С., Риман Я.С. Метод расчета кратковременного безопасного тока. – В кн. Взрывобезопасное электрооборудование. Вып. 6 М., Энергия, 1969.
2. Савин В.Ф. Существует ли общая энергетическая мера различных аварийных поражающих воздействий на человека? // Безопасность труда в промышленности – 1999. - №6. – с. 29-32.
3. ГОСТ 12.1.030 – 82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 6 с.
4. 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.
5. Лейбов Р.М., Озерной М.И. Электрификация подземных горных работ. – М.: Недра, 1972. – 464 с.