Анализируя процесс стабилизации давления рис.3, замечаем некоторую неточность регулирования в режимах близких к установившимся, возникновение бифуркаций которые в данном случае незначительны и упорядочиваются. Теоретически остается возможность перехода системы в хаотический режим. Чтобы исключить возможность неустойчивой работы, и ограничить нижний порог качества управления, можно использовать эталонную математическую модель, осуществляя управление по параметрам модели при возникновении необходимости.

Выводы. Предложенная векторная система управления обладает универсальностью, и применима для различных объектов. При этом остается вероятность возникновения неустойчивой работы в режимах близких к установившимся. Применение нелинейных регуляторов существенно сокращает время переходных процессов, что особенно актуально для объектов с быстро изменяющимися свойствами.

Список литературы

1. **Агамалов О. Н., Лукаш Н. П.** Альтернативне нелінійне ПІД-управління з використанням векторної помилки. //Електроінформ, 2008. – №2. – с. 8-13
2. **В.С. Моркун, В.М. Радионов** Адаптивная САУ гидроциклоном на основе модели разделения минералов в ультразвуковом поле, Вісник Криворізького національного университету, вип. 30, 2012
3. **Моркун В.С., Потапов В.Н., Моркун Н.В., Подгородецкий Н.С.** Ультразвуковой контроль характеристик измельченных матери-алов в АСУ ТП обогатительного производства. - Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. - 283 с.
4. **Дик** И.Г., Матвиенко О.В., Неессе Т. Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне // Теоретические основы химической технологии, 2000, Том 34, №5, с с. 478-488
5. **A. Farzanegan, M. Gholami, M.H. Rahimyan** Multiphase flow and tromp curve simulation of dense medium cyclones using Computational Fluid Dynamics Journal of Mining & Environment Vol.4, No.1, 2013, 67-76
6. **Suasnabar, D.J.** (2000). Dense Medium Cyclone Performance, Enhancements Via Computational Modeling of The Physical Process, Ph.D. Thesis, University of New South Wales.

Рукопись поступила в редакцию 22.02.14

УДК 621.395.14

О.М. СІНЧУК, д-р техн. наук, проф., І.О. СІНЧУК, канд. техн. наук, доц.,
Криворізький національний університет
С.М. БОЙКО, аспірант, Кременчуцький національний університет ім. Мих. Остроградського

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ АВТОНОМНИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК В ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Оцінено можливість і проаналізована специфіка функціонування вітроенергетичних комплексів в умовах підземних виробок залізорудних шахт. Для реалізації оптимально-можливої ефективності функціонування вітроенергетичних установок обгрунтовано й запропоновано структуру електромеханічної частини вітроенергетичного комплексу і його конструкція в цілому.

Проблема та її зв’язок з науковими та практичними завданнями. У зв’язку з зростанням попиту на електричну енергію (ЕЕ), та цін на її виробництво, а також комплексом екологічних обмежень, все більш актуальним стає завдання збільшення об'ємів отримання ЕЕ шляхом використання поновлюваних нетрадиційних джерел, особливо енергії вітру, яка за допомогою вітрових електричних установок (ВЕУ) перетворюється в електричну [1,2].

Аналіз досліджень і публікацій. Аналіз досліджень та публікацій показав широкомасштабне впровадження ВЕУ як в Україні, так і світі [1].

Однак, впровадження ВЕУ у підземних виробках залізорудних шахт, при наявності, в силу технології ведення гірничих робіт, постійного вентиляційного потоку, поки ще не відбулося [3].

Постановка завдання. Розробка теоретичних аспектів використання повітряного вентиляційного потоку підземних гірських виробок залізорудних шахт для отримання електричної енергії.

Викладення матеріалу і результати. Для досягнення вищевикладеної мети була оцінена та проаналізована можливість і специфіка роботи вітроенергетичних комплексів (ВЕК) в умовах діючих підземних виробок залізорудних шахт (ЗРШ). Запропонована для подальших уточнень і досліджень первинна структура конструкції комплексу з вертикальною віссю обертання перетворення енергії вітру [2,3].

Рівняння неперервності повітряного потоку з швидкістю u в змінних Ейлера має слідуючий вигляд [4]

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\rho\cdot div\vec{u}=0 \tag{1}$$

де $div\vec{u}$ - дивергенція вектора швидкості $\vec{u}$, $\rho(x,y,z,t)$ - густина, $\vec{u}(x,y,z,t)$ - швидкість руху газу.

Або у вигляді

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z)=0$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\rho\cdot div\vec{u}+(\vec{u}grad\rho)=0$$

або

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\rho\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)+\frac{\partial\rho}{\partial x}u_x+\frac{\partial\rho}{\partial y}u_y+\frac{\partial\rho}{\partial z}u_z=0, \tag{2}$$

де gradρ - градієнт густини ρ.

Для умови нестисненості середовища (газу повітря) рівняння нерозривності має вигляд

$$div\vec{u}=0\text{, так як }\frac{\partial\rho}{\partial t}=0,$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}=0 \tag{3}$$

Для умови руху середовища, що встановився, рівняння нерозривності приймає вигляд

$$div(\rho\vec{u})=0\text{, так як }\frac{\partial\rho}{\partial t}=0\text{, або }\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}=0 \tag{4}$$

Рівняння руху (рівняння Ейлера) у векторній формі має вигляд [5]

$$\frac{du}{dt}+(\vec{u}\nabla)\vec{u}=\vec{\sigma}_m-\frac{1}{\rho}gradp \tag{5}$$

де $\vec{\sigma}_m$ - напруженість; p - тиск; ρ - густина; $\vec{u}$ - швидкість, $\nabla=\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}$ - оператор «набла».

В проекціях на осі координат в прямокутній системі координат рівності (1) і (2) можна записати так

$$\frac{\partial u_x}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_x}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_x}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_x}{\partial z}=\sigma_x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial x}$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_y}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_y}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_y}{\partial z}=\sigma_y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial y}$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_z}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_z}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}=\sigma_z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial z} \tag{6}$$

Для умови руху середовища, що встановилося, рівняння руху має вигляд

Так, як $\frac{du}{dt}=0$, то $\frac{du_ч}{dt}=\frac{du_н}{dt}=\frac{du_я}{dt}=0$, тобто

$$\sigma_x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial x}=0\qquad\sigma_y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial y}=0\qquad\sigma_z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial z}=0 \tag{7}$$

Процеси аеродинаміки вітроагрегату описуються усередненими по Рейнольдсу рівняннями Навьє-Стокса нестискуваного середовища

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=0;\quad\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial(u_ju_i)}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+\nu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{8}$$

де x_i, i = 1,2 - декартові координати (x,y); t - час; u_j - декартові складові вектора середньої швидкості (u,v); p - тиск; ρ - густина; ν і ν_t - молекулярний і турбулентний коефіцієнти кінематичної в'язкості.

Як початкові умови задавалися параметри незбуреного потоку у всій розрахунковій області.

На зовнішній межі застосовувалися граничні умови, для розрахунку яких використовувався метод характеристик.

На поверхні твердого тіла враховувалась умова прилипання.

Рівняння руху в'язкого газу запишеться у вигляді рівняння Навьє-Стокса у векторній формі

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{\sigma}_m - \frac{1}{\rho} gradp + \nu\Delta\vec{u} + \left(\frac{\zeta}{\rho} + \frac{\nu}{3}\right) graddiv\vec{u} \tag{9}$$

при умові, що $\zeta = const$ і $\nu = const$, де $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ - кінематична в'язкість (коефіцієнт внутрішнього тертя), ζ - друга в'язкість, $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ - оператор Лапласа, $\vec{\sigma}_m$ - напруженість поля масових сил; ρ - густина; p - тиск.

У проекціях на осі координат прямокутної системи координат рівняння руху в'язкого газу прийме слідуючий вигляд

$$\frac{du_x}{dt} = \sigma_{\mathrm{x}} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}\right) + \left(\frac{\zeta}{\rho} + \frac{\nu}{3}\right)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}\right)$$

$$\frac{du_y}{dt} = \sigma_{\mathrm{y}} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2}\right) + \left(\frac{\zeta}{\rho} + \frac{\nu}{3}\right)\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}\right)$$

$$\frac{du_z}{dt} = \sigma_{\mathrm{z}} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right) + \left(\frac{\zeta}{\rho} + \frac{\nu}{3}\right)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}\right) \tag{10}$$

Для нестискуючого середовища $div\vec{u} = 0$, тоді рівняння Навьє-Стокса матиме вигляд

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{\sigma} - \frac{1}{\rho} grad\vec{p} + \nu\Delta\vec{u},$$

або запишемо це рівняння у вигляді без тиску р через $rot\vec{u}$ і $rot\vec{\sigma}$, та оператор Δ

$$\frac{\partial}{\partial t} rot\vec{u} = rot\vec{\sigma} + rot\left[\vec{u} rot\vec{u}\right] + \nu rot\vec{u} \tag{11}$$

Для випадку потенціального поля масових сил $rot\vec{\sigma} = 0$, тоді рівняння Навьє-Стокса матиме вигляд

$$\frac{\partial}{\partial t} rot\vec{u} = rot\left[\vec{u} rot\vec{u}\right] + \nu rot\vec{u} \tag{12}$$

Для ідеального газу $\nu = 0$, тоді $\nu\Delta rot\vec{u} = 0$, рівняння Навьє-Стокса матиме вигляд (13)

$$\frac{\partial}{\partial t} rot\vec{u} = rot\vec{\sigma} + rot\left[\vec{u} rot\vec{u}\right] \tag{13}$$

Друга похідна є додатковою величиною і залежить від хімічної природи газу або складових повітря, від тиску, температури, проявляється при деформації всебічного стиску, який супроводжується зміною густини середовища.

Рівняння енергії, згідно першого закону термодинаміки, для рухомої системи має слідуючий вигляд

$$d\left(U + \frac{Mu^2}{2}\right) = \partial Q + \partial A' \text{ або } d\left(H + \frac{Mu^2}{2}\right) = \partial Q + \partial A' + d(pV), \tag{14}$$

де U - внутрішня енергія; H - ентальнія системи; p - тиск; M - маса системи; δQ - підведена ззовні кількість теплоти; $\delta A'$ - робота здійснена зовнішніми силами; u -швидкість руху середовища (системи).

У диференціальній формі, через оператори (у векторній формі) закон збереження енергії для стискуючого в'язкого середовища має вигляд

$$\rho\frac{dU}{dt}=\varepsilon+div\left(kgrad\vec{T}\right)-pdiv\vec{u}+$$
$$+\eta\left(2\left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)^2\right]+\left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u_x}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)^2\right]-\frac{2}{3}\left(div\vec{u}\right)^2\right)+\zeta\left(div\vec{u}\right)^2 \quad (15)$$

де U - внутрішня енергія.

Запишемо рівність (15) через ентальпію у вигляді

$$\rho\frac{dh}{dt}=\varepsilon+\frac{dp}{dt}+div\left(kgrad\vec{T}\right)+$$
$$+\eta\left(2\left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)^2\right]+\left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u_x}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)^2\right]-\frac{2}{3}\left(div\vec{u}\right)^2\right)+ \quad (16)$$
$$+\zeta\left(div\vec{u}\right)^2$$

де h - ентальпія одиниці маси; ρ - густина; T - абсолютна температура; p - тиск; $\vec{u}$ - швидкість; k - коефіцієнт теплопровідності; η - динамічна в'язкість (коефіцієнт внутрішнього тертя); ς - коефіцієнт другої в'язкості; ε - кількість теплоти, яка поступає в одиницю об'єму за одиницю часу в результаті випромінювання, або інших причин, крім теплопровідності.

Рухомий газ (повітря), що рухається може переносити не тільки масу, кількість руху, енергію, але й інші речовини (дрібні тверді частинки, краплини рідини і т.д. або які-небудь властивості і якості (завихреність, ентропію і т.д.).

Рівняння переносу в диференційній формі [5]

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{\partial\left(Fu_i\right)}{\partial x_i}-f=0 \quad (17)$$

або перетворивши його в рівність одержимо

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(Fu_i\right)=f \quad (18)$$

рівняння переносу в диференційній формі для випадку, коли перенесення будь-якої форми середовища або властивості здійснюється в результаті руху газового середовища, тобто $u_i \neq 0$.

Якщо швидкість повітряного потоку рівна нулю і джерело речовини або властивості, що переноситься відсутнє тоді відповідно рівняння (18) $\partial F/\partial t=0$, тобто концентрація речовини, що переноситься, постійна величина в даній точці об'єму V з часом.

А це значить, що концентрація речовини F не змінюється в даній точні з часом.

Враховуючи розсіювання речовини F, що переноситься в наслідок дифузії, під час підрахунку теплової енергії, переданої даному об'єму V, в шляхом теплопровідності, тобто дифузії молекул в даному об'ємі повітря в шахті, одержимо рівняння переносу в вигляді

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(Fu_i\right)=f+D\frac{\partial^2 F}{\partial^2 x_i} \quad (19)$$

де D - коефіцієнт дифузії молекул.

Це рівняння переносу речовини F в диференційній формі в об'ємі V, з урахуванням передачі теплоти даному об'єму газу, шляхом теплопровідності (дифузії молекул у даному об'ємі).

Перенесення кількості руху із одного слою газового потоку в другий в результаті внутрішнього тертя в газах (рівняння Ньютона) має вигляд

$$dF=-\eta\frac{\partial u}{\partial x}dS\,, \quad (20)$$

де dF -елементарна сила внутрішнього тертя діюча на елементарну площадку dS поверхні слою; $\partial u/\partial x$ - градієнт швидкості руху слоїв один відносно іншого в напрямку X, перпендикулярному до поверхні слою; η - коефіцієнт внутрішнього тертя, чисельно рівний силі тертя між сусідніми слоями з площею поверхні, що дорівнює одиниці при градієнті швидкості, =одиниці.

Перенесення внутрішньої енергії в результаті теплопровідності в однорідному стаціонарному випадку (T=T(x)) при наявності градієнта температури (Рівняння Фур'є)

$$dQ = -k\frac{\partial T}{\partial x}dSdt\,, \qquad (21)$$

де $k = \frac{1}{3}\overline{u}\overline{\lambda}\rho c_v$, dQ - кількість теплоти, перенесеної за час dt через елементарну поверхню dS, в напрямку в сторону зменшення температури, k - коефіцієнт теплопровідності, $\partial T/\partial x$ - градієнт температури; $\overline{u}$ - середня швидкість теплового руху молекул; $\overline{\lambda}$ - середня довжина вільного пробігу молекул ρ - густина газу; c_v - питома теплоємність при сталому об'ємі V.

Турбулентне перенесення у багато разів інтенсивніше за молекулярне. Режим руху повітря можна встановити по *числу Рейнольдса* [4,5]

$$\mathrm{Re} = uD/\nu \qquad (22)$$

де u - середня швидкість руху повітря у виробленні, м/с; D - гідравлічний діаметр виробки, м; ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м^2/с

$$D = 4S/P\,, \qquad (23)$$

де S і P - площа поперечного перетину (м^2) і периметр виробки (м). У гладких трубах:

Вільні струмені підкоряються тим же законам, що і обмежені струми.

У них діють молекулярні і турбулентні напруги, а також пульсаційні швидкості.

Так, потужність, яку буде виробляти вітрова установка, залежить не лише від швидкості потоку, але й від геометричних розмірів вітрового колеса, коефіцієнту використання енергії вітру, густини середовища (у даному випадку шахтного повітря).

Можлива величина потужності, відібрана вітроустановкою, визначиться за формулою, Вт

$$N_{vey} = 0{,}5\rho u^3 SE \qquad (24)$$

де E - коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ), %; ρ - густина повітря, м^3/кг; u - швидкість вітру, м/с; S - площа, описана лопатями вітрового колеса, м^2.

Площа, описана лопатями вітрового колеса, визначається за формулою (25), м^2

$$S = 2\pi Rb\,, \qquad (25)$$

де R - радіус вітрового колеса, м; b - висота вітрового колеса, м.

Коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ) ідеального вітряка обчислюється за формулою Жуковського [2,5] і становить 0,593.

Для ортогональних вітряків КВЕВ цей коефіцієнт становить від 0,15 до 0,2. У даному випадку можна прийняти E = 0,2.

Потужність вітрової установки в заданому діапазоні швидкостей вітру з врахуванням коефіцієнту корисної дії ВЕК визначиться за формулою, Вт

$$P_{vey} = 0{,}5\rho u^3 SE\eta_{vey} \qquad (26)$$

Висновки та напрямок подальших досліджень. Використання вентиляційних повітряних потоків підземних виробок залізорудних шахт, з перетворенням вітрової енергії вентиляційних потоків на електричну, є реальна можливість генерувати й використовувати електричну енергію для власних потреб підземних підприємств, заощадивши при цьому засоби на закупівлю електричної енергії.

Список литературы

1. **Сінчук О.М., Бойко С.М., Щербак М.А.** Обґрунтування вибору типу генератора для вітроенергетичної установки, яка працює в умовах залізорудних шахт// Гірнича електромеханіка та автоматика. Дніпропетровськ: Наук. – техн. зб. – 2012. – Вип. 89. – С. 150 – 153.

2. **Сінчук О.М., Бойко С.М., Щербак М.А.** Про залежність енергетичних координат вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання від аеродинамічних умов шахт// Технічна Електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». Частина 4 – Харків, Інститут Електродинаміки НАН України, 2012. – С.171-172.

3. **Сінчук І.О., Бойко С.М., Щербак М.А.** Обгрунтування можливості використання ортогональної вітрової установки в умовах підземних гірничих виробок шахт //Технічна Електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». Частина 4 – Харків, Інститут Електродинаміки НАН України, 2012. – С. 179-181.

4. **Яворский Б.М.** Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / **Б.М. Яворский, А.А. Детлаф** // – «Наука» М. – 1971. – С. 134 – 269.

5. **Горбунов В.И.** Вентиляция шахт. – Магнитогорск. – 2007. – С. 24–50.

Рукопис подано до редакції 17.03.14

УДК 621.316.925.014.6

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., А.Г. ЛИКАРЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
А.А. ПЕТРИЧЕНКО, аспирант, Криворожский национальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Приведены результаты исследований защитных характеристик аппаратов защиты от токов утечки АЗАК и САЗУ в условиях комбинированной электрической сети. Установлена безперспективность направления создания новых аппаратов защиты на постоянном оперативном токе на базе существующих аппаратов защити для комбинированных электрических сетей.

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Эксплуатация электротехнических комплексов в особо опасных условиях, каковыми являются предприятия с подземными способами добычи полезных ископаемых, напрямую связана с необходимостью защиты горнорабочих от поражения электрическим током при случайном прикосновении их к токоведущим частям находящихся под напряжением.

Известные и пока еще применяемые на отечественных горных предприятиях аппараты защиты людей, такие как «реле утечки» в силу массового применения импульсных преобразователей для питания электрической энергией электротехнических комплексов, и связанные с этим факты искажения форм кривых тока и напряжения в сетях, являются не эффективными. Необходим поиск и разработка новых аппаратов защиты с новыми защитными характеристиками, позволяющим активно выполнять функции защиты людей в новых структурах электрических сетей – комбинированных, т.е. как с синусоидальными так и искаженными, в силу преобразования, формами тока и напряжения.

Постановка задания. Целью работы является исследование защитных характеристик аппаратов защиты от токов утечки АЗАК и САЗУ в условиях комбинированной электрической сети для оценки возможности использования в них постоянного тока для контроля сопротивлений изоляции и утечек.

Изложение материала и результаты. Для проведения исследования защитных характеристик АЗАК и САЗУ, аппаратов имеющих принципиально различные схемные решения, была создана физическая модель комбинированной сети. Она содержала промышленный выпрямитель и тиристорный преобразователь напряжения, а в качестве их нагрузки использовалась система “двигатель - генератор”. Генератор нагружался на балластные сопротивления. Параметры изоляции участков сети принимались сосредоточенными, а их имитация осуществлялась набором соответствующих сопротивлений (резисторов) и конденсаторов. Испытание аппаратов защиты осуществлялись методом активного эксперимента. Общие условия и методика испытаний аппаратов защиты соответствовала ГОСТ 22929 [1]. Защитные характеристики представлены в относительных единицах, при базовой величине уставки по отключающему сопротивлению утечки, кОм $r'_{уст} = U_ф / I_{дл.д} = 220В/25мА = 8{,}8$.

На рис. 1 представлены защитные характеристики аппаратов АЗУР (1,3,5) и САЗУ (2,4,6) в комбинированной сети, содержащей электропривод постоянного тока, питаемый через нерегулируемый выпрямитель.