

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 321.313.322

ЗНИЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ НАГРІВАННЯ ТОРЦЕВОГО ПАКЕТА ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О. Г. Кенсицький, докт. техн. наук, **Д. І. Хвалін**, асп., **Н. Л. Сорокіна**

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

e-mail: kensitsky@ukr.net

Розроблено математичну модель перебігу теплообмінних процесів у торцевому пакеті осердя статора потужного турбогенератора. Проаналізовано рівні нагрівань зубців, що знаходяться у міжфазній зоні та поза нею. Запропоновано заходи щодо зменшення тангенціальної нерівномірності та рівнів нагрівання зубців торцевого пакета. Цілеспрямований перерозподіл потоку охолоджуючого водню разом із підвищенням теплопровідності сталі упоперек пакета дають змогу на 15 % знизити загальний рівень нагрівань торцевої зони осердя статора. Бібл. 7, рис. 6, табл. 2.

Ключові слова: турбогенератор, осердя статора, торцевий пакет, нерівномірність нагрівання, охолодження.

Низкою експериментальних [1] і теоретичних [2-4] досліджень доведено, що в потужних турбогенераторах при експлуатації спостерігається тангенціальна нерівномірність нагрівання торцевого пакета осердя статора. Особливо це стосується режимів недозбудження й споживання реактивної потужності, коли температура окремих зубців по колу може відрізнятися у 1,8...2 рази.

Особливо це стосується зубців міжфазних зон, прилеглі пази яких містять стрижні різних фаз обмотки статора. До того ж встановлено, що рівень нагрівання зубців міжфазної зони залежить від місця розташування стрижнів різних фаз у прилеглих пазах. А саме, максимум температур спостерігається у зубцях, сусідні пази яких містять стрижні різних фаз у нижньому шарі обмотки. І рівень цього нагрівання може перевищувати припустимі для заліза статора значення (120 °С), що в експлуатації негативно впливає на надійність обмотки і турбогенератора в цілому. Все це вимагає впровадження додаткових заходів щодо зниження цих нагрівань та їх нерівномірностей по тангенціальній координаті торцевої зони осердя статора.

Таким чином, актуальною задачею є розроблення й обґрунтування ефективних технічних рішень, спрямованих на зниження як тангенціальної нерівномірності, так і рівнів нагрівання торцевого пакета осердя статора турбогенератора в різних режимах експлуатації. Це передбачає створення математичної моделі перебігу теплообмінних процесів у торцевому пакеті осердя статора потужного турбогенератора, проведення варіаційних розрахунків нагрівання окремих зон пакета при різних навантаженнях і умовах охолодження, а також розроблення та оцінку ефективності технічних рішень.

У роботі розглядається нагрівання торцевого пакета осердя статора турбогенератора ТГВ-200. При створенні математичної теплової моделі прийнято низку припущень, які спрощують розрахунки і разом з тим не впливають на адекватність моделі реальним фізичним процесам:

- враховуючи наявність транспозиції елементарних провідників стрижня, прийнято, що тепловідлення в міді розподілені рівномірно;

- теплові втрати в сталі осердя статора в радіальному напрямку задані за результатами експериментальних досліджень для турбогенератора аналогічної потужності [4];

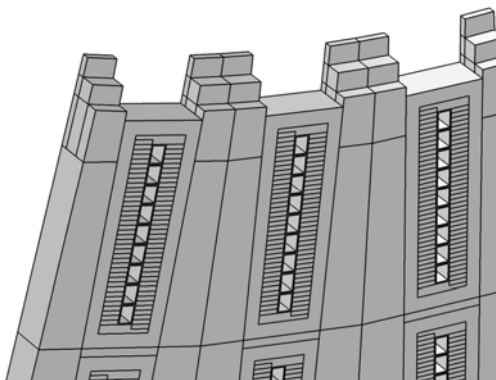


Рис. 1

- елементи розрахункової області розглядаються як однорідні анізотропні тіла з усередненими теплофізичними характеристиками матеріалів за відповідним напрямком у межах елементарних розрахункових обсягів;

- коефіцієнти тепловіддачі з охолоджуючих поверхонь визначаються за відповідними критеріальними залежностями та експериментальними даними [5, 6];

- залежність теплофізичних параметрів (коефіцієнтів теплопровідності, питомої щільності, теплоємності) матеріалів обмотки і осердя статора від температури не враховується;

- при виборі розрахункової області враховуються симетрія і періодична повторюваність елементів конструкції обмотки і осердя статора, умов охолодження і тепловиділень по колу статора;

- втрати в міді стрижня та в сталі осердя статора, а також теплофізичні параметри (коефіцієнти теплопровідності, питомої щільності та теплоємності) задаються для очікуваної розрахункової температури.

З огляду на наведені припущення, конструктивні особливості турбогенератора та наявну схему циркуляції холодоагенту розглядається польова задача спільного розрахунку тривимірного температурного поля для сектора торцевого пакета осердя та обмотки статора. Для можливості співставлення рівнів нагрівань зубців міжфазної зони, коли прилеглі пази містять стрижні різних фаз обмотки у нижньому шарі, з нагріваннями зубців із стрижнями однієї фази у сусідніх пазах розрахункова схема охоплює три зубцевих (пазових) ділення статора (рис. 1). Для пазової частини обмотки математично коректно описано тепловий зв'язок з осердям (сталлю) статора. Аналогічно описаний тепловий зв'язок відповідних поверхонь пакета і охолоджуючих трубок стрижня з охолоджуючим воднем.

Опис температурного поля виконано за допомогою системи диференціальних рівнянь теплопровідності

$$c(\theta, l)\rho(\theta, l)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \text{div}(\lambda(\theta, l) \cdot \text{grad}\theta) + q_v(\theta, l)$$

з такими граничними умовами: $\theta_{x_i} = \pm \frac{\lambda_M}{\alpha_{x_i}} \frac{\partial\theta}{\partial l_i}$ – для охолоджуючих каналів охолоджуючих

трубок стрижнів; $\theta_{x_i} = \pm \frac{\lambda_3}{\alpha_{x_i}} \frac{\partial\theta}{\partial l_i}$ – для зовнішніх теплообмінних поверхонь пакета осердя ста-

тора; $\pm \lambda_i \frac{\partial\theta_i}{\partial n}(\xi-0) = \Lambda_k [\theta_i(\xi+0) - \theta_j(\xi-0)]$ і $\Lambda_k [\theta_i(\xi+0) - \theta_j(\xi-0)] = \pm \lambda_j \frac{\partial\theta_j}{\partial n}(\xi+0)$ – на межі

дотичних поверхонь елементів розрахункової області.

У загальному вигляді задача є нелінійною, її розв'язання здійснюється методом скінченних елементів у тривимірній (просторовій) постановці. Передбачається, що розглянута крайова задача є коректною, тобто вона має рішення і тільки одне, яке безперервно залежить від вхідних даних. Процес поширення тепла в загальному виді описується законом збереження енергії (рівнянням теплового балансу).

Теплофізичні параметри основних матеріалів елементів конструкції осердя й обмотки статора та коефіцієнти тепловіддачі основних поверхонь теплообміну, що задані при розрахунках нагрівання торцевого пакета, наведені у табл. 1 і 2 відповідно (табл. 1 – теплофізичні параметри конструкційних матеріалів, що закладені у розрахунковій моделі торцевого пакета осердя статора турбогенератора ТГВ-200; табл. 2 – коефіцієнти тепловіддачі основних теплообмінних поверхонь розрахункової моделі торцевого пакета осердя статора турбогенератора ТГВ-200).

Розподіл і рівень втрат за пакетом заданий за результатами експериментальних досліджень на діючому турбогенераторі [5].

Таблиця 1

Найменування матеріалу	Розрахункове значення коефіцієнта теплопровідності, Вт/(м·К)
Мідь провідників стрижня	400
Головна ізоляція стрижня (клас В)	0,185
Сталь пакета	
- уздовж листів	20
- упоперек листів	1,9
Склотекстоліт прокладок між стрижнями	0,34
Ізоляція елементарних провідників	0,22
Ізоляція охолоджуючої трубки	0,2
Нержавіюча сталь охолоджуючих трубок	17
Епоксидна мастика	0,59

Тонкошарові структури, такі як ізоляція елементарного провідника (0,17 мм на сторону) та ізоляція охолоджуючої трубки стрижня (0,2 мм на сторону), враховувалися шляхом використання еквівалентного коефіцієнта тепловіддачі – відношення теплопровідності відповідної ізоляції до її товщини ($\alpha_{\text{екв}} = \lambda_i / \delta_i$).

Адекватність моделі реальному перебігу теплообмінних процесів перевірено шляхом співставлення розрахункового розподілу температурного поля у режимі номінального навантаження з результатами експериментальних досліджень для зубця поза міжфазною зоною, сусідні пази біля якого містять стрижні однієї фази [5]. Співставлення розрахункового розподілу перегрівань сталі торцевого пакета уздовж осі зубця з даними експериментальних досліджень [5] показано на рис. 2.

Таблиця 2

Найменування теплообмінної поверхні	Розрахункове значення коефіцієнта тепловіддачі, Вт/(м ² ·К)
Поверхня розточки статора	200
Внутрішня поверхня охолоджуючої трубки стрижня обмотки	175
Радіальний канал між першим і другим пакетами	
- у зубцевій зоні	160
- у зоні ярма	100
Канал між натискною плитою і торцевим пакетом	
- у зубцевій зоні	90
- у зоні ярма	100
Зовнішня поверхня ярма	120

Різниця для окремих зон складає не більше 3 °С, що для теплових розрахунків можна вважати припустимим.

Теплові втрати у зубці міжфазної зони визначались з врахуванням даних експериментальних досліджень на масштабній фізичній моделі кінцевої зони турбогенератора [5]. Ними, зокрема, було встановлено, що теплові втрати в зубцях, прилеглі пази яких містять стрижні різних фаз у нижньому шарі обмотки, у 1,795 разу перевищують теплові втрати у зубцях, якщо сусідні пази біля них мають стрижні лише однієї фази.

На рис. 3 наведено результати розрахунку температурного поля торцевого пакета осердя статора турбогенератора ТГВ-200 при номінальному навантаженні для зубця міжфазної зони та зубця, що знаходиться поза нею (температура охоло-

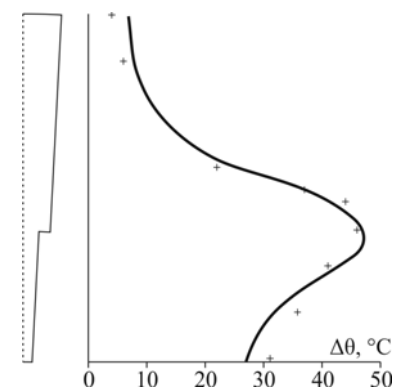


Рис. 2

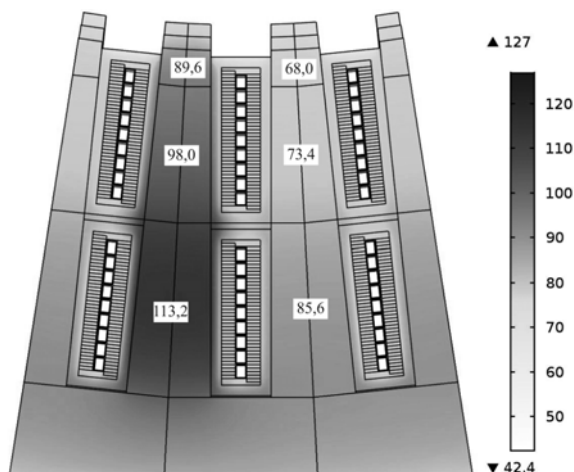


Рис. 3

водню. Як показують попередні оцінки, найбільша частка теплових втрат відводиться із торцевих поверхонь пакета у радіальних вентиляційних між першим та другим пакетами, а також у вентиляційному каналі між натискною плитою та крайнім пакетом (майже 95 %).

Тому одним із ефективних засобів зменшення тангенційної нерівномірності нагрівання є перерозподіл потоку охолоджуючого водню між натискною плитою і крайнім пакетом зі збільшенням його обсягу, що спрямовується на охолодження саме міжфазних зон, шляхом збільшення відповідних отворів у газорозподільному циліндрі. За рахунок цього потік водню у міжфазній зоні (а відповідно і коефіцієнт тепловіддачі) може бути збільшений у 1,5...2 рази без погіршення охолодження інших елементів і вузлів торцевої зони статора турбогенератора.

У цьому випадку розглянуте підвищення тепловіддачі торцевої поверхні зубця міжфазної зони у вентиляційному каналі між натискною плитою і пакетом у 1,5 рази. Відповідно до отриманих результатів навіть за рахунок такої інтенсифікації охолодження міжфазної зони максимальні температури пакета можуть бути зменшені на 7 %, до 118 °С. На рис. 4 показано розподіл температур на торцевій поверхні першого пакета осердя статора турбогенератора ТГВ-200 при інтенсифікації охолодження міжфазної зони.

Іншим перспективним напрямком зменшення загального рівня нагрівань торцевого пакета осердя статора є підвищення теплової провідності шихтованого заліза уперек листів. Однією з технологій, що дає змогу досягти бажаного, є склеювання пакетів кінцевої зони, наприклад, за допомогою епоксидного клею ЕК-3. З одного боку, це підвищує механічну стійкість пакетів у режимах змінного навантаження та недозбудження турбогенератора. З іншого боку, як свідчать дослідження [7], теплопровідність клеєного пакета становить у середньому 3,4 Вт/(м·К), що майже вдвічі перевищує аналогічний показник при відсутності склеювання (1,9 Вт/(м·К)). Додавання ж у клей дисперсних ізоляційних наповнювачів із високою теплопровідністю ($\geq 5-10$ Вт/(м·К)) дасть змогу довести еквівалентну теплопровідність пакета до 5...6 Вт/(м·К).

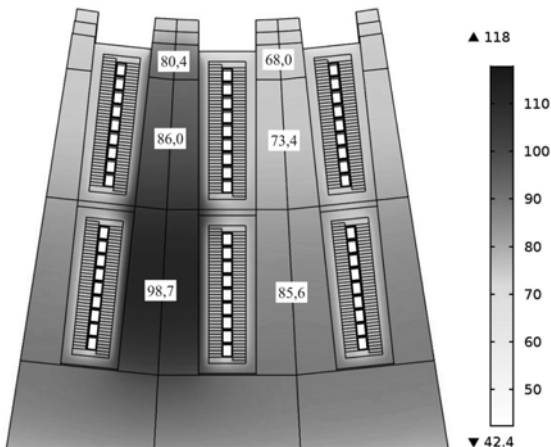


Рис. 4

джуючого водню – 40 °С). Тут же наведені значення температур на торцевій поверхні пакета, звідки можна визначити, що при прийнятих припущеннях максимальна температура сталі пакета у міжфазній зоні при номінальному навантаженні перевищує граничний рівень. І слід очікувати, що в режимах недозбудження при споживанні реактивної потужності рівень температур буде ще більшим. Окрім цього, максимум температури розташований всередині пакета, приблизно на середині його товщини.

Основними напрямками зменшення тангенційної нерівномірності й рівнів нагрівання торцевого пакета осердя статора турбогенератора ТГВ-200 є, перш за все, інтенсифікація відведення теплових втрат до охолоджуючого

водню. Тут же наведені значення температур на торцевій поверхні пакета, звідки можна визначити, що при прийнятих припущеннях максимальна температура сталі пакета у міжфазній зоні при номінальному навантаженні перевищує граничний рівень. І слід очікувати, що в режимах недозбудження при споживанні реактивної потужності рівень температур буде ще більшим. Окрім цього, максимум температури розташований всередині пакета, приблизно на середині його товщини.

На рис. 5 представлено результати розрахунку нагрівання торцевого пакета при його поперечній теплопровідності у 3,4 Вт/(м·К). Максимальний рівень температур сталі зубців пакета при цьому становить 118 °С (зменшення на 7 %).

Одночасне впровадження інтенсифікації охолодження міжфазної зони й підвищення поперечної теплопровідності сталі (рис. 6) дає змогу понизити максимальне нагрівання зубця до 109 °С (на 14 %). У цьому випадку може бути

досягнутий запас за максимальною температурою зубців пакета у $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дає змогу розширити діапазон навантаження турбогенератора в режимах недозбудження із дотриманням припустимої температури осердя статора.

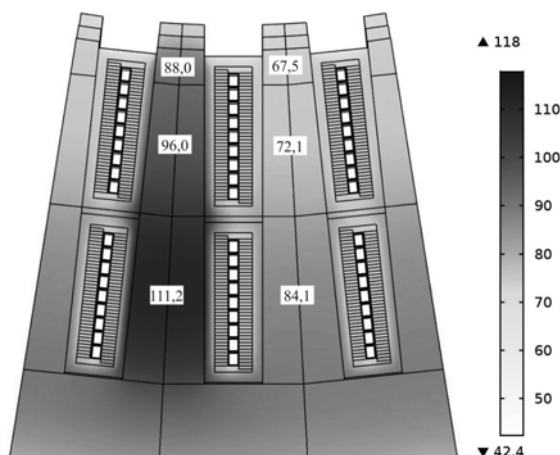


Рис. 5

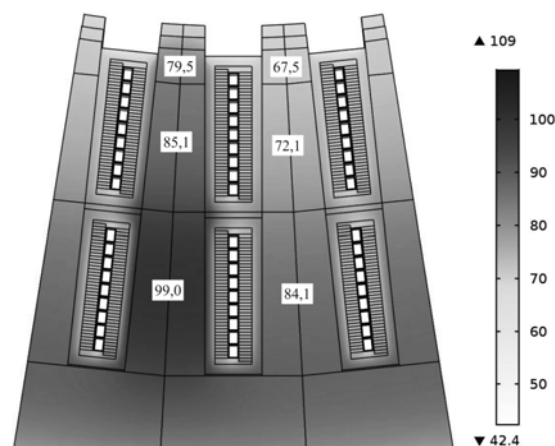


Рис. 6

Висновки

1. Нагрівання зубців міжфазної зони торцевого пакета осердя статора потужного турбогенератора, прилеглі пази яких містять стрижні різних фаз у нижньому шарі обмотки, в номінальному режимі навантаження досягає $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. При експлуатації машини в режимах недозбудження із споживанням реактивної енергії температури цих зубців будуть перевищувати припустимі відповідно до ГОСТ 533-2000 (МЭК 34-3-88) значення. Що негативно впливає на стан головної ізоляції, знижує надійність турбогенератора.

2. Ефективними методами покращання відведення теплових втрат від торцевого пакета турбогенератора ТГВ-200 є інтенсифікація охолодження міжфазної зони шляхом перерозподілу потоку водню між натискною плитою і першим пакетом, а також підвищення поперечної теплопровідності сталі пакета за рахунок застосування технології склеювання листів заліза. Впровадження таких заходів дає можливість на 14% знизити максимальні температури сталі пакета і розширити діапазон регулювання споживання реактивної потужності в режимах недозбудження.

1. Костяев Б.В., Пташкин А.В. О нагреве крайних пакетов сердечника статора крупных турбогенераторов при недозбудженнии. *Электрические станции*. 1979. № 5. С. 40–44.
2. Данилевич Я.Б., Пипко Р.М. Магнитное поле в торцевой зоне сердечника статора электрической машины переменного поля с учетом влияния пазового рассеяния. *Электротехника*. 1982. № 9. С. 36–39.
3. Смородин В.И., Карацуба А.С., Руденко Л.Н. и др. Некоторые особенности электромагнитных процессов на торце статора турбогенератора. *Техн. электродинамика*. 1983. № 3. С. 65–72.
4. Титко А.И., Федоренко Г.М., Лившиц А.Л., Кобзарь К.А. Тангенциальная неравномерность электромагнитных и тепловых характеристик в крайних пакетах турбогенератора при изменении нагрузки. *Гидроэнергетика Украины*. 2012. № 3. С. 48–53.
5. Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки. Киев: Наук. думка, 1985. 208 с.
6. Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В. Проектирование турбогенераторов. Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. 256 с.
7. Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Терешонков В.А., Выговский В.И. Электрические машины с жидкостным охлаждением / под ред. Счастливого Г.Г.: АН УССР. Ин-т электродинамики. Киев: Наук. думка, 1989. 288 с.

УДК 321.313.322

О.Г. Кенсницкий, докт. техн. наук, **Д.И. Хвалин**, асп., **Н.Л. Сорокина**

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, 03057, Киев, Украина

Снижение неравномерности нагрева торцевого пакета сердечника статора мощного турбогенератора

Разработана математическая модель теплообменных процессов в торцевом пакете сердечника статора мощного турбогенератора. Проанализированы уровни нагревов зубцов, находящихся в межфазной зоне и вне ее. Предложены мероприятия по снижению тангенциальной неравномерности и уровней нагрева зубцов тор-

цевого пакета. Целенаправленне перераспределение потока охлаждающего водорода вместе с повышением поперечной теплопроводности стали пакета позволяет на 15 % снизить общий уровень нагревов торцевой зоны сердечника статора. Библ. 7, рис. 6, табл. 2.

Ключевые слова: турбогенератор, сердечник статора, торцевой пакет, неравномерность нагрева, охлаждение.

O.H. Kensytskyi, D.I. Khvalin, N.L. Sorokina

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, 03057, Kyiv, Ukraine

Reduction of heating non-uniformity for laminated stator core end of high-power turbo-generator

The mathematical model of heat-exchange processes in the end laminating stator core sheets of high-power turbo-generator is developed. The heating of the teeth in the interfacial area and outside the area is analyzed. The ways to reduce the tangential non-uniformity and levels of heating of the stator core teeth are proposed. The directed redistribution of cooling hydrogen stream along with increased transverse thermal conductivity gives a possibility to decrease the total heating of the end stator core sheets by 15 %. References 7, figures 6, tables 2.

Key words: turbo-generator, stator core, end laminating sheets, non-uniformity of heating, cooling.

Надійшла 27.11.2017

Received 27.11.2017

УДК 621.3.085.5 : 62-27

ПРУЖНИЙ ЕЛЕМЕНТ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗУСИЛЬ В СТЯЖНИХ ПРИЗМАХ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

А.С. Левицький¹, докт. техн. наук, **Є.О. Зайцев²**, канд. техн. наук, **А.М. Смирнова³**

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

3 – Київський національний торговельно-економічний університет,
вул. Кіото, 19, Київ, 02156, Україна

e-mail: lev@ied.org.ua

Досліджено трубчастий пружний чутливий елемент (ПЧЕ) первинного перетворювача зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора. Запропоновано методика розрахунку трубчастого ПЧЕ, яка дає змогу проектувати конструкції вимірювачів зусиль при зміні навантажень у широкому діапазоні. Визначено аналітичні співвідношення для розрахунку розмірів елемента. Отримано функцію перетворення «зусилля – відносна поздовжня деформація» з урахуванням зміни площі поперечного перерізу елемента відповідно до коефіцієнта Пуассона. Розраховано відносну похибку, зумовлену нелінійністю функції перетворення. Встановлено аналітичні залежності інформаційного сигналу від зусиль у пружному елементі для тензорезистивних, ємнісних та волоконно-оптичних вимірювачів. Библ. 12, рис. 7.

Ключові слова: турбогенератор, осердя статора, стяжна призма, зусилля, вимірювання, трубчастий пружний елемент, функція перетворення, похибка.

Для оцінювання (у процесі складання, експлуатації та оглядів) стану спресованості осердя статора потужного турбогенератора (ТГ) можуть бути застосовані вимірювачі зусиль у стяжних призмах. За результатами вимірювання з'являється можливість відрегулювати ступінь затягування призм гайками для забезпечення рівномірності розподілу між призмами зусиль віддачі активної сталі осердя [3, 10].

Зручним способом вимірювання зусиль у призмах є застосування перетворювачів, які встановлюються під стяжні гайки, коли зусилля в стяжній призмі сприймається спеціальним пружним чутливим елементом (ПЧЕ) і перетворюється в пропорційний інформаційний сигнал. ПЧЕ є механічною, а перетворювач сигналу – електричною частиною вимірювача.

Використання сучасних електровимірювальних засобів в якості перетворювачів сигналів дає змогу реалізовувати перетворення вимірювальної величини в цифровий код з до-