

“ჭკვიანი” კონსტრუქციებისა და ადაპტირების კონცეპტუალიზებისათვის

მამუკა მაცაბერიძე¹, ინგა ჯანელიძე²

¹პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიის და მეტალურგიის ფაკულტეტი

²ასოცირებული პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიის და მეტალურგიის ფაკულტეტი

აბსტრაქტი

სტატიაში განხილულია „smart“ მასალების ფუნქციური სისტემოლოგია, რომელიც წარმოადგენს დაპროექტების ახალ ფილოსოფიას, რაც აერთიანებს სენსორების, შემსრულებელი მექანიზმების და მართვის ელემენტების სქემების მოქმედებებს ერთ სისტემაში. „smart“ მასალებს შეუძლიათ შეცვალონ საკუთარი ფუნქციები გარემოს ცვლილებებზე დამოკიდებულებით. „smart“ მასალების ინტელექტუალურ კონსტრუქციას არაერთი მნიშვნელოვანი უპირატესობა აქვს ტრადიციულთან შედარებით.

საკვანძო სიტყვები: „smart“ მასალები, „smart“ კონსტრუქციები, ინტელექტუალური კონსტრუქცია, ინტელექტუალური, ადაპტური, აქტიური, მგრძობიარე, მეტამორფული კონსტრუქციები, მასალები და სისტემები, ფლატერი, აქტუატორები.

კაცობრიობის ხანგრძლივი ისტორიის განმავლობაში, მასალები ადამიანის მიერ მხოლოდ გამოიყენებოდა ვიდრე იქმნებოდა. იარაღები კეთდებოდა და თავშესაფრები შენდებოდა ხელმისაწვდომი მასალებისგან, მაგრამ ამ მასალების ფუნდამენტური ბუნება არ იცვლებოდა. ადამიანთა ცივილიზაციის განვითარებამ გააჩინა ჯერ საჭიროება და შემდეგ შესაძლებლობა, შექმნილიყო ისეთი მასალები, რომლებიც დააკმაყოფილებდნენ გარკვეულ მოთხოვნებს - ასე გაჩნდა ბრინჯაო, ფოლადი, შეღებილი ქსოვილი, კერამიკა და სხვა, თითოეული ამ მასალისთვის საწყისი ნედლეული შეიკრიბა და დამუშავდა ისე, რომ მიღებული იქნა ახალი მასალები საჭირო თვისებების სპეციალური მახასიათებლებით.

მეოცე საუკუნეში საბუნებისმეტყველო (ფიზიკა, ქიმია, ბიოლოგია) მეცნიერებების სწრაფმა განვითარებამ ფართო თეორიული საფუძველი შექმნა არსებული ბუნებრივი მასალების თვისებების ახსნისა და ახალი, ხელოვნური მასალების შესაქმნელად, ხოლო მძლავრი კომპიუტერების გამოჩენამ შესაძლებელი გახადა ამ ბაზის გარდაქმნა პრაქტიკული კონსტრუირების და დამზადების საწარმოო ტექნოლოგიების სხვადასხვა მეთოდოლოგიად, ახალი მასალების საწარმოებლად.

კაცობრიობის გამორჩეული თვისება იყო მისი სურვილი ეკონტროლებინა გარემო პირობები, რათა ცხოვრება უფრო კომფორტული ყოფილიყო. თითქმის მთელი ისტორიის მანძილზე კაცობრიობა იყო ამგვარი მმართველობის (აქ იგულისხმება გარემო პირობების კონტროლი) მთავარი ელემენტი. რაც უფრო რთული მექანიზმები და სტრუქტურები იქმნებოდა, აშკარა ხდებოდა არაბიოლოგიური მექანიზმების კონტროლის აუცილებლობა, გარემოს მდგომარეობიდან გამომდინარე, ავტომატურ რეჟიმში - თავად ადამიანის მონაწილეობის გარეშე.

უძველესი მართვის სისტემის ერთ-ერთი მაგალითია **საზღვაო ღუნა**, რომელიც გამოიყენებოდა (და დღესაც აქტუალურია) მცურავი გემების შესანარჩუნებლად ზღვის ტალღებზე დაშვებული იალქნებით ქარიშხლიან ამინდში.

მეცხრამეტე საუკუნემდე მანქანების და მათთან დაკავშირებულ კონტროლის სისტემები შეზღუდული სირთულის იყო. როდესაც ინდუსტრიული რევოლუციის დროს სწრაფად განვითარდა დიდი და მძლავრი მანქანები, ერთდროულად დაიწყო მართვის მექანიკური ადაპტაციური ელემენტების შექმნა. ასეთი კონტროლის მარტივი მაგალითია გამონაბოლქვის სარქველი, რომელიც ხელს უშლის ორთქლის ძრავებში ზღვრული წნევის ზღვრების მიაღწევას და ორთქლის ქვების აფეთქებას.

ამჟამად, **ადაპტური მართვის** სფერო ძალიან სწრაფად გაფართოვდა, ძირითადად კომპიუტერის გამოგონების გამო. მექანიკური სისტემების რთული მოდელები ახლა შეიძლება გამოყენებულ იქნას მართვის კანონების განსაზღვრისა და განხორციელებისათვის. ციფრულ კომპიუტერზე დამოკიდებულების გამო, **ადაპტაციური მართვის** კვლევა მხოლოდ თანამედროვე ეპოქაში გახდა შესაძლებელი.

მეოცე საუკუნის მეორე ნახევრიდან მოყოლებული, მეცნიერებმა დაიწყეს იმგვარი ელექტრონული მოწყობილობების შექმნის გზების ძიება, რომლებსაც შეეძლებოდათ პრობლემების გადაჭრა ადამიანების მსგავსად. მაშინ ჩანდა, რომ ასეთ მოწყობილობებს „ხელოვნური ინტელექტი“ უნდა ჰქონოდათ. იმ დროს გამოგონილი ციფრული კომპიუტერი თავდაპირველად არ იყო შესაფერისი ამ ტიპის კვლევისთვის. ადრეული კომპიუტერების ალგორითმები ასახავს მათ შიდა ფიქსირებულ არქიტექტურას და იყენებდნენ წრფივი სერიული მონაცემების დამუშავებისას. ალგორითმები დაპროგრამებული იყო კომპიუტერის ძირითადი საოპერაციო ინსტრუქციების გამოყენებით, მანქანურ ენაზე და მიზნად ისახავდა რიცხვითი მონაცემების დიდი მასივების დამუშავებას.

კომპიუტერის, როგორც ხელოვნური ინტელექტის განხორციელების ინსტრუმენტად გამოსაყენებლად შემუშავდა მაღალი დონის სიმბოლური ენები და შეიქმნა პარალელური კომპიუტერების (და ალგორითმების) ახალი არქიტექტურები ნეიროლოგიური შესაძლებლობებით. ამის შედეგი იყო კომპიუტერზე დაფუძნებული სისტემები, რომლებიც იყენებდნენ რეკურსიულ არაწრფივ მეთოდებს ადაპტირებისთვის და საკუთარი კომპიუტერული არქიტექტურის გადაკონფიგურირებისათვის (ანუ ხელახალი კონფიგურირებისათვის), რაც განპირობებულია გარემოში არსებული ცვლილებებით. ტექნოლოგიური ევოლუციის მთავარი იდეა, რომელიც იწვევს „ჭკვიანი“ ანუ ე.წ. **smart-კონსტრუქციის** გაჩენას, არის ადაპტაციის იდეა. ასეთი სტრუქტურების ერთ-ერთი მთავარი მახასიათებელია ის, რომ ისინი ადაპტირდებიან ცვალებად პირობებთან. ადაპტირებული მასალები, ადაპტური გამოთვლები და ადაპტური მართვის სისტემები ყველა წარმოადგენს სრულყოფილ სფეროებს ე.წ. **smart-კონსტრუქციის** კვლევის ფარგლებში. ზოგადად, **smart-კონსტრუქციები** უნდა შეიცავდეს ელემენტებს, რომლებიც დამზადებულია გარკვეული მასალებისგან, რითაც უზრუნველყოფილი უნდა იყოს ისეთი უნარები, რომ:

- შეცვალოს მთლიანი სტრუქტურის თვისებები, როგორც მთლიანობაში, სხვადასხვა ფიზიკური ბუნების გარე ველების გავლენის ქვეშ (ელექტრული, მაგნიტური, ტემპერატურა და ა.შ.);
- ობიექტის მდგომარეობის შესახებ მონაცემების შეფასება და მოქმედების შესახებ გადაწყვეტილების მიღება (ასეთ სტრუქტურებზე კვლევის ფარგლებში შემუშავებული გამოთვლითი მეთოდებით);
- განსაზღვროს და შეასრულოს სწორი მოქმედება (ცოდნის ან შესაბამისი მართვის კანონების საფუძველზე).

ადაპტირების უნარი არ იქმნება მხოლოდ სტრუქტურული ორგანიზაციის უმაღლეს დონეზე, ის ასევე შეიძლება იყოს წარმოდგენილი ძირითადი მასალის დონეზეც, საიდანაც მზადდება **smart-კონსტრუქციის** სტრუქტურული ელემენტები. პროფესიულ ტექნიკურ საზოგადოებაში გაიმართა ფართო დისკუსიები **smart-მასალებსა** და **smart-კონსტრუქციებთან** [1-4] დაკავშირებულ რიგ საკითხებზე, კერძოდ: რა არის ეს; შეიძლება თუ არა **smart-მასალები** ჩაითვალოს **smart-კონსტრუქციების** ქვესიმრავლედ; ერთი და იგივეა თუ არა **smart-კონსტრუქცია** და **ინტელექტუალური კონსტრუქცია**.

ეს დისკუსია როგორც აღძრულია, ისეა შეყვანილი ჩიხში ტექნიკური საზოგადოების მიერ, ამ ახალი სფეროს მართლაც ინტერდისციპლინარული ხასიათის გამო. **smart-მასალების** და **smart-კონსტრუქციათა** კვლევა მოიცავს იმდენ ტექნიკურად განსხვავებულ სფეროს, რომ თითქმის ტიპიური გახდა ერთი დარგისთვის სრული გაუგებრობა, ტერმინოლოგიისა და სხვა სფეროებში, მიმდინარე საქმეთა მდგომარეობის შესახებ. დაფიქსირდა სხვადასხვა ტერმინები: **ინტელექტუალური, ადაპტური, აქტიური, მგრძობიარე, მეტამორფული კონსტრუქციები, მასალები და სისტემები.**

თუ მკაცრად მივყვებით ლექსიკონის სემანტიკურ განმარტებებს, მაშინ აშკარაა, რომ ინტელექტუალური, გონივრული, ადაპტირებული და ა.შ. არის ზედსართავი სახელები სხვადასხვა მნიშვნელობით. **ინტელექტუალობა** გულისხმობს აბსტრაქტული აზროვნების და ძველი ცოდნის სრულიად ახალ სიტუაციებში გამოყენების უნარს, ხოლო **სიბრძნე/რაციონალურობა** გულისხმობს ცოდნის შეგროვებისა და სწორი გზით გამოყენების უნარს. **სენსიტიურობა/მგრძობელობა** გულისხმობს ინფორმაციის შეგროვების უნარს და იმის ცოდნას თუ რა სახის ინფორმაციის შეგროვება ხდება, მაგრამ ეს ყოველივე არ გულისხმობს ამ ინფორმაციით სწავლისა და გადაწყვეტილების მიღების უნარს. **ინტელექტუალობა და რაციონალურობა/სიბრძნე**, ზოგადად რომ ვთქვათ, აღწერს გონებრივ აქტივობას და ადაპტაციური, აქტიური და მეტამორფული "პასუხისმგებელია" ფიზიკურ აქტივობაზე. ამ ტერმინებს შორის განსხვავება ძირითადად მდგომარეობს საქმიანობის სახეობაში. **აქტიური** უბრალოდ ნიშნავს, რომ არსებობს ფიზიკური აქტივობა, ხოლო **ადაპტირება** ნიშნავს, რომ აქტივობის შედეგები მხოლოდ არსებული კონფიგურაციის ცვლილებებია. **მეტამორფული**, თავის მხრივ, სერიოზულ გარდაქმნებს ნიშნავს. რაც შეეხება ტერმინებს **მასალა** და **სტრუქტურა**, ისინი განსხვავდებიან მხოლოდ მასშტაბით. და ბოლოს, **სისტემა**, რომელიც **ხაზს უსვამს კომპონენტების ერთობლივ მუშაობას საერთო მიზნის მისაღწევად**, ხოლო მის კომპონენტებს ინდივიდუალურად შეიძლება ჰქონდეთ მიზნები, რომლებიც განსხვავდება კოლექტიური მიზნისაგან. უნდა აღინიშნოს, რომ ტერმინები რაციონალური/ბრძნული, ინტელექტუალური ან ადაპტური ფართოდ გამოიყენება ფუნქციონირების ერთი და იგივე დონის აღსაწერად, და არცერთი მათგანი არ ამბობს, როგორ ხდება ტერმინის რეალიზება დეტალურად. მაგალითად, მგრძობელობა უბრალოდ ნიშნავს ინფორმირებულობას, მაგრამ არა ინფორმირებულობას ცნობიერებას ხედვის სისტემების, ტექტილური,¹¹ სენსორების ან ნებისმიერი სხვა სენსორული ტექნოლოგიის მეშვეობით.

ბოლო დროს გაბატონდა შეხედულება, რომ ინტელექტუალური, რაციონალური, ადაპტური, აქტიური მგრძობიარე და/ან მეტამორფული მასალები და სტრუქტურები წარმოადგენენ სრულიად განსხვავებულ სისტემებს და აქვთ განსხვავებული ატრიბუტები.

ჰკვიანი მასალები ან **smart-კონსტრუქციები** შეიძლება შეფასდეს, როგორც სისტემები, რომლებიც ცვლის საკუთარ თვისებებს გარემოს ცვლილებების მიხედვით. ბუნება, როგორც ყოველთვის, ინჟინრების შთაგონების მთავარი წყაროა, რომელიც გულისხმობს მიდგომას ტექნოლოგიური მოწყობილობების შექმნისადმი, რომელშიც იდეა და მოწყობილობის ძირითადი ელემენტები ნასესხებია ცოცხალი ბუნებიდან.

ბიოლოგიური ობიექტების ანალოგიით, **smart -სისტემები** შეიცავს[5]:

- სენსორულ ელემენტებს, რომლებიც მოქმედებს როგორც ნერვული სისტემა;
- რეალურ დროში მონაცემთა დამუშავების მოწყობილობებს, რომლებიც მოქმედებენ როგორც სისტემის კონტროლის ცენტრები;

¹¹ (ლათ. tactilis შეხებითი) - ტაქტილური შეგრძნებები - შეხებითი შეგრძნებები.

<http://www.nplg.gov.ge/gwdict/index.php?a=term&d=13&t=12775>

- მგრძობიარე (პასიური) სტრუქტურებს, რომლებსაც აქვთ მიკრომგრძობიარე ელემენტების სტრუქტურულად ინტეგრირებული სისტემა, რათა განისაზღვროს ობიექტის მდგომარეობა და, შესაძლოა, გარემო, რომელშიც ის მუშაობს;
- მორეაგირე **smart-კონსტრუქციებს**, რომლებსაც აქვთ "ნერვული სისტემა" და ავტომატური კონტროლის დახურული ენერგეტიკული სისტემა სტრუქტურის თვისებების შესაცვლელად (სიმტკიცე, ფორმა, პოზიცია, ორიენტაცია და სიჩქარე);
- ინტელექტუალურ სისტემებს, რომლებსაც შეუძლიათ თვითსწავლება ადაპტაციისას.

ასე რომ, **smart-მასალები** წარმოადგენს დაპროექტების ახალ ფილოსოფიას, რომელიც აერთიანებს სენსორების, შემსრულებელი მექანიზმების და მართვის ელემენტების სქემების მოქმედებებს ერთ სისტემაში, რომელსაც შეუძლია შეცვალოს საკუთარი რეაქცია მოსახერხებელი გზით და გარემოს ცვლილებებზე დამოკიდებულებით. ასეთ ინტელექტუალურ კონსტრუქციას არაერთი მნიშვნელოვანი უპირატესობა აქვს ტრადიციულთან შედარებით, რაც ჰენრი პეტროსკიმ დაასაბუთა თავის წიგნში «To Engineer Is Human»¹², სადაც მან აღნიშნა, რომ დაპროექტებისას გამოცდილი დამპროექტებელი ყველაზე ცუდ შემთხვევას აუცილებლად განიხილავს; შედეგად, პროექტს აქვს უსაფრთხოების მაღალი ზღვარი მრავალნაირი უზრუნველყოფის, ელემენტების დუბლირების, ქვესისტემებისა და გაზრდილი მასშტაბის გამო.

ამგვარი მიდგომა, რა თქმა უნდა, მოითხოვს უფრო მეტ ბუნებრივ რესურსს, ვიდრე ზოგადად საჭიროა და მოიხმარს მეტ ენერგიას სტრუქტურის მუშაობის შესანარჩუნებლად. ამ მიდგომით, მეტი ადამიანური ძალისხმევა იხარჯება აგრეთვე იმ გარემოებების დაპროგნოზირებაზე, რომლებშიც აგებული ობიექტი დაპროექტდა სწორად ან არასწორად.

უარესი შემთხვევის განჭვრეტის მცდელობებს უფრო სერიოზული და აშკარა ნაკლი აქვს, რომლის შესახებაც დროდადრო ვკითხულობთ გაზეთებში და გვესმის სადამოს ამბებში: ყველა შესაძლო გარემოების განჭვრეტის შეუძლებლობა. არავის სურს შეცდომებზე სწავლა, მაგრამ წარმატებული გადაწყვეტილებებიდან საკმარისად ვერ ვისწავლით.

ინჟინერ-დამპროექტებლები, ინტელექტუალური კონსერვატორების პოპულარული განმარტებისგან განსხვავებით, უდავოდ არიან მოვლენათა ავანგარდში. ისინი მუდმივად ცდილობენ გამოიყენონ ახალი კონცეფციები, რათა შეამცირონ წონა და შესაბამისად კონსტრუქციის ღირებულება, გააკეთონ მეტი ნაკლები დანახარჯებით და შედეგად, კონსტრუქცია არის მასალების ეფექტური გამოყენების კარგი ნიმუში.

ინჟინერს ყოველთვის სჯერა, რომ რაღაცას აკეთებს შეცდომის გარეშე, მაგრამ სიმართლე ისაა, რომ ყოველ ახალ კონსტრუქციას შეუძლია ახალი სასამართლო პროცესი გამოიწვიოს. ... ახსნა, თუ რა მოხდა არასწორად და მიუთითოთ ცვლილებები, რომლებიც მუშაობდნენ, ბევრად უფრო ადვილია, ვიდრე შეცდომების ძიება პროექტში, რომელიც ჯერ კიდევ არ არის განხორციელებული. თქვენ არა მხოლოდ უნდა დაადგინოთ პროექტის „გამოცანები“, არამედ

¹² Petroski H. To Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design. – New York: St. Martin's Press, 1985. – 247 p.

შეამოწმეთ თქვენი „გადაწყვეტა“, შეამოწმეთ ყველა შესაძლო გზა, რომლითაც შესაძლებელია გამოწვეული იქნას სტრუქტურის რღვევა. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მნიშვნელოვანია, რომ დამპროექტებელმა ინჟინერმა გაიგოს და შეამოწმოს ყველა შესაძლო ჰიპოთეზა იმის შესახებ, თუ რა ტიპის დატვირთვები, სტრესები, ტემპერატურა და ა.შ. შეგხვდეს საექსპლუატაციო რეჟიმისას.

ზემოთქმულის საპირისპიროდ, **ჭკვიანი მასალების სისტემებს** შეუძლიათ თავიდან აგვაცილონ მრავალი პრობლემა. შექმნილნი კონკრეტული მიზნით, ისინი ცვლიან ქცევას, როცა დგება განსაკუთრებული გარემოებები.

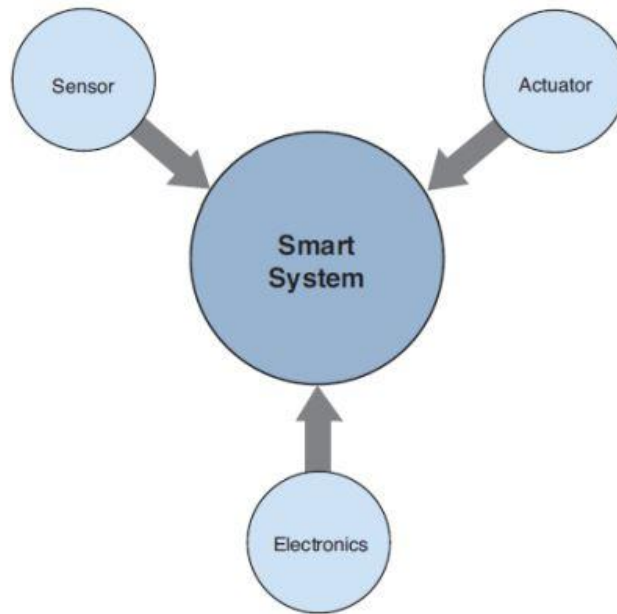
მაგალითად, გადატვირთულ კიბეს, ელექტროენერჯის გამოყენებით, შეუძლია გააფრთხილოს ადამიანი და გაზარდოს მისი(კიბის) სიმტკიცე. **კიბის რეაქცია** შეიძლება ეფუძნებოდეს მისი მუშაობის რეალურ გამოცდილებას, რღვევისა და დაძველების გათვალისწინებით. და, შედეგად, კიბე, რომელმაც „დაადგინა“ საკუთარი ამჟამინდელი მდგომარეობა, როდესაც ის ვეღარ შეძლებს მუშაობას მინიმალური დატვირთვითაც კი, ამის სიგნალს გამოსცემს. გარკვეულწილად, კიბე ჰგავს ცოცხალ ძვალს, რომელიც ადადგენს საკუთარ თავს ცვალებადი დატვირთვისას. მაგრამ ძვლისგან განსხვავებით, რომელიც რეაქციას იწყებს იმპულსიდან რამდენიმე წუთში და მისი ზრდის დასრულებას თვეები სჭირდება, **ინტელექტუალური კიბე წამებში იცვლება.**

შეიძლება დაფაროს ხიდები **"ჭკვიანი საღებავებით"**, რომლებიც გვაცნობებენ ქარის დატვირთვის ან გადატვირთულობის შესახებ, ან შენობებს, რომლებიც საშუალებას გაძლევთ დააკვირდეთ დატვირთვის ქვეშ მყოფი სტრუქტურის მთლიანობას, ან თუნდაც შეაკეთოთ მცირე ბზარები გარემომცველი მასალის გამოყენებით.

შესაძლებელია სპეციალური **"სუფთა ოთახის"** დამზადება აქტიური საფარით, რომელსაც შეუძლია შეაგროვოს მტვერი და ჭუჭყი გარკვეულ ადგილებში. თქვენ შეგიძლიათ ააწყოთ კედლები, რომლებიც გრძნობენ ვიბრაციას და აქტიურად შთანთქავენ ხმაურს. მაგრამ როგორ შეიძლება ამის პრაქტიკაში გამოყენება?

სტრუქტურულად, **"ჭკვიანი სისტემები"** (მასალები ან სტრუქტურები) მოიცავს:

- ჩაშენებულ ან ზედაპირზე დამონტაჟებულ სენსორებს;
- ჩაშენებულ ან ზედაპირზე დამონტაჟებულ ამძრავებს (აქტუატორებს);
- კონტროლის ელემენტების სქემებს მართვის სისტემის უზრუნველსაყოფად (აქ იგულისხმება: სენსორების მონაცემების დამუშავების შესაძლებლობა შესაბამისი გადაწყვეტილებების მისაღებად).



სურათი 1. „ჭკვიანი“ ანუ smart-სისტემების სტრუქტურული ტოპოლოგია

გრაფიკული ინფორმაციის წყარო: Smart materials for the 21st Century. Foresight Smart Materials Taskforce. Report Smart Materials & Systems Committee no. FMP/03/04/IOM3 56 p. <http://www.iom3.org/foresight>.

სენსორები და აქტუატორები კონსტრუქციებში დიდწილად იმეორებენ ბუნებაში ცნობილ ხდომილებებს, ანუ ჩვენი ხუთი გრძნობის მიხედვითაა (მხედველობა, სმენა, ყნოსვა, გემო და შეხება) შექმნილი ვიზუალური, ოპტიკური, აკუსტიკური, ულტრაბგერითი, ელექტრო, ქიმიური და თერმული, მაგნიტური სენსორები. რეაგირება ამ პირველადი სენსორებისაგან გარდაიქმნება სიგნალებად, რომლებიც გადაეცემა ინფორმაციის დამუშავების ცენტრს და მართვის ბლოკს („ტვინს“) შემდგომი დამუშავებისთვის. ინფორმაციის დამუშავების გარდა, ეს მართვის ბლოკი მოქმედებს როგორც პროცესორი, რომელიც იღებს გადაწყვეტილებას შეყვანილი მონაცემების საფუძველზე.

„ჭკვიანი“ ანუ smart-სტრუქტურების[6] კონცეფციის უმარტივესი ფორმით განსახორციელებლად, საუკეთესოდ შეეფერება კომპოზიტური მასალები, რომლებშიც (ე.ი. ამ კომპოზიტებში), მათი წარმოების პროცესში, შესაძლებელია სენსორების ან აქტივატორების ჩაშენება.

smart-სტრუქტურები, რომლებიც მოიცავს მხოლოდ სენსორებს, პასიურს უწოდებენ.

კომპოზიტური მასალის დამზადებისას მათში სენსორების ჩაშენება შესაძლებელს ხდის მასალის შიდა მდგომარეობაზე დაკვირვებას, ამიტომ პასიური smart-სტრუქტურების წარმატებული განვითარება დამოკიდებულია:

- შესაფერისი სენსორების შემუშავებასა და რეგულირებაზე;
- სენსორების მუშაობის პრინციპებსა და სიგნალის დამუშავების მეთოდებზე;
- შესაფერისი წარმოების სქემის შერჩევაზე, რომელიც საშუალებას იძლევა ჩაშენდეს სენსორები, **smart-სტრუქტურებში**, სირთულის გარეშე.

დღეისათვის, მკვლევარების განსაკუთრებული ყურადღება გამახვილებულია ორი ტიპის მასალაზე, რომლებიც ყველაზე მოსახერხებელია ინტელექტუალურ სისტემებში სენსორების ან გადამწოდების სახით ჩასაშენებლად - ესაა ოპტიკური ბოჭკოები და პიეზოელექტრული მასალები.

ოპტიკურ-ბოჭკოვანი სისტემის სენსორებს შეუძლიათ გაზომონ მაგნიტური ველები, დაძაბულობა, ვიბრაცია და აჩქარება და კარგად მოერგონ კომპოზიტური მასალის წარმოების პროცესს; შეუძლია გაუძლოს დეფორმაციებს, რომლებიც შესატყვისია თავად კომპოზიტის ზომასთან; არის მცირე ზომის, მსუბუქი და ადვილად დასამზადებელი; არ ექვემდებარებიან ელექტრომაგნიტურ ინტერფერენციას (ჩარევის მიმართ) და მკაცრ გარემოში აჯობებენ სხვა სენსორებს მგრძობელობით.

ოპტიკურ-ბოჭკოვანი სენსორები ასევე შეიძლება ადვილად იყოს ინტეგრირებული დისტანციური მართვის სხვა მოწყობილობებთან და საშუალებას მისცემს კომპოზიტური სტრუქტურის მონიტორინგს მისი არსებობის ყველა ეტაპზე:

- წარმოება, ტესტირება და ექსპლუატაცია;
- მდგრადია აგრესიული გარემოს მიმართ და არ რეაგირებს ელექტრული და მაგნიტური ხმაურის მიმართ;
- გააჩნია ფართო რეაგირების სიხშირის დიაპაზონი.

ოპტიკურ-ბოჭკოვანი სენსორებმა კარგად „წარმოაჩინა“ თავი, როგორც მასალაში სრულად ჩაშენებისას, ასევე გარედან დაფიქსირებისას. ოპტიკური ბოჭკოების ჩაშენება გულისხმობს კომპოზიციური მასალების წარმოების პროცესში ცვლილებების შეტანის აუცილებლობას, რათა სენსორები ზუსტად განთავსდეს საჭირო ადგილებში და დავრწმუნდეთ, რომ სიგნალები მათგან, როგორც შემავალი ასევე გამომავალი, შეიძლება იყოს გამტარებით ტრანსლირებული.

გამოსაყენებლად ვარგის ბოჭკოვან სენსორს უნდა შეეძლოს:

- გამოიწვიოს მინიმალური გადახრები კომპოზიტურ მასალაში გამაძლიერებელი ბოჭკოების განსაზღვრული განაწილებიდან.
- თუ შესაძლებელია, არ გააუარესოს კომპოზიტის მექანიკური თვისებები.
- არ დაუშვას სიგნალის გადაჭარბებული შესუსტება და არ განადგურდეს ჩაშენების პროცესში, წინააღმდეგ შემთხვევაში შეუძლებელი იქნება საჭირო გაზომვების განხორციელება.
- ჰქონდეთ შესაბამისი საშუალებები, გამტარების მეშვეობით, სისტემაში ლაზერული შუქის შეყვანისა და გამოყვანისათვის.

პიეზოელექტრიკის, როგორც სენსორების ფართო გამოყენებამ უზრუნველყო მათი უპირატესობები:

- ფართო სიხშირის დიაპაზონი.
- პიეზოელექტრული მასალის ძალიან თხელი ფენების გამოყენების შესაძლებლობა, როდესაც ისინი ფიქსირდება ზედაპირზე ან ჩაშენებულია კომპოზიტიური მასალის შიგნით.
- მარეგულირებელი მოქმედების დაგვიანების არარსებობა.
- მექანიკური სიმარტივე.

ბოლო დროს, პიეზოკერამიკის ნაცვლად, გამოიყენება პიეზოელექტრული პოლიმერები, მაგალითად ისეთი, როგორიცაა ვინილიდენის ფლუორიდი[7] (**polyvinylidene fluoride – PVDF**), რომელიც ყველაზე ხშირად გამოიყენება სენსორებად და რომლებიც შეიძლება დაფიქსირდეს ნებისმიერი ტიპის და ნებისმიერი, თუნდაც ძლიერ მრუდი, გეომეტრიის ზედაპირზე.

ასეთ სენსორებს შეუძლიათ გაიმეორონ ადამიანის კანის შესაძლებლობები, აღმოაჩინონ გეომეტრიული ნიშნები, როგორიცაა კიდები და კუთხეები, ტემპერატურა ან განასხვავონ სხვადასხვა მასალა. ამრიგად, PVDF ზოლების მგრძნობელობა საკმარისად მაღალია, რათა განასხვავოს უსინათლოთა წიგნების შრიფტის ტიპები და სახეხი („ნაჟდაკიანი“) ქალაქის კლასები.

აქტუატორები ანუ შემსრულებელი მექანიზმები ესაა წარმოებისთვის საჭირო აქტივატორები, რომლებსაც შეუძლიათ გამოიწვიონ კონსტრუქციის დეფორმაცია, სენსორებისგან მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე, რომელიც აღწერს სისტემის ფიზიკურ მდგომარეობას.

ამჟამად გამოიყენება როგორც აქტივატორები:

- ფორმის მახსოვრობის ფუნქციის შენაძნობები;
- პიეზოელექტრული მასალები;
- ელექტროსტრიქციული მასალები;
- მაგნიტოსტრიქციული მასალები;
- ელექტრორეოლოგიური სითხეები.

მიუხედავად ერთი შეხედვით ფანტასტიურობისა, **smart-სისტემებმა** (მასალები და სტრუქტურები) უკვე იპოვეს გამოყენება რეალურ ცხოვრებაში - მოულოდნელად მრავალრიცხოვანი და მრავალფეროვანი.

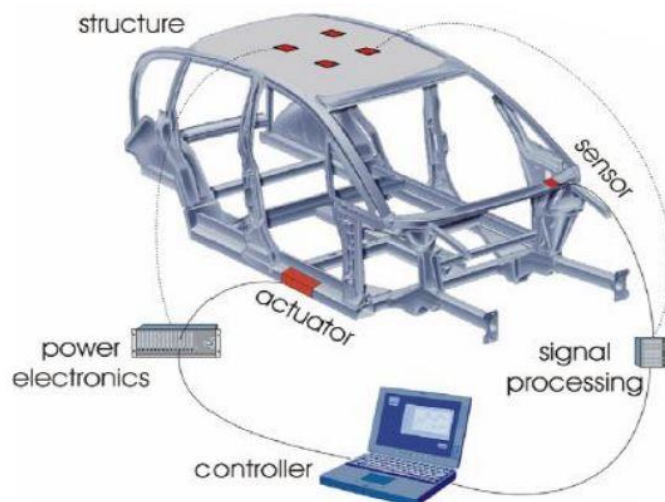
მაგალითად, მარტივი პიეზოელექტრული დინამიკები, ოკულარის პოზიციონირების მექანიზმები სკანირების მიკროსკოპებზე, მანქანის თვითჩაზნელებადი მინები, ავტოფოკუსირებადი მრავები კამერებისთვის, სახლის სპორტული აღჭურვილობა ელექტრო რეგულირებადი წინააღმდეგობით, თვითგანლაგებადი მოწყობილობები კორონარული

სისხლძარღვების გახსნის შემდეგ. ანგიოპლასტიკისას, გამოსახულების სამედიცინო აპარატი და ა.შ.

smart-ტექნოლოგიების გამოყენებაზე დაფუძნებული კონსტრუქციების გამოყენებას იწყებენ, როგორც ხმაურის შემცირების საშუალებას შვეულმფრენების და თვითმფრინავების სალონ/კაბინებში, სამრეწველო ჰაერის დაჭირხვისას, მაცივრებსა და ვენტილატორების, დიზელის ძრავებში და სატვირთო მანქანების კაბინაში გამონაბოლქვი აირების ხმის შთანთქმისთვის; ძრავის ვიბრაციის შემცირებისთვის, ნახევრად ავტომატური სატრანსპორტო საშუალებების ბორბლების საკიდებში, შეჯახების თავიდან აცილებისათვის რადარებში და უსაფრთხოების სისტემებში, კრიტიკულ ინდუსტრიებში ან პლატფორმებზე სატელევიზიო კამერებით, ტურბინის ფრთების ხმაურის და წყალქვეშა ნავების ექოს ჩასახშობად, კოსმოსური კონსტრუქციების ფორმის კონტროლისა და ვიბრაციის შემცირებისთვის, ტელესკოპებში და ა.შ. ჩამონათვალი შეიძლება გაგრძელდეს, მაგრამ ესეც საკმარისია **smart-კონსტრუქციების** შესაძლო გამოყენების ფართო სპექტრის საჩვენებლად.

ძველ დროში, დიზაინი ეფუძნებოდა გარე მახასიათებლების იმიტაციას. მაგალითად, ლეონარდო და ვინჩის (**Leonardo da Vinci**) საფრენი აპარატები დაფუძნებულია ფრინველების ფრენის პრინციპებზე, გემის გლუვი კორპუსი თევზის კორპუსს ჰგავს, თვითმფრინავის სტაბილიზატორების მართვის პრინციპები კი – დიდი მტაცებელი ფრინველებისგანაა „ნასესხები“. მეცნიერების განვითარებამ და კვლევის ტექნიკურმა მხარდაჭერამ გამოიწვია ინტერესი და ბევრი ახალი იდეა, რომელთა დახმარებით მკვლევარები ცდილობენ შექმნან სტრუქტურები, რომლებიც ბაძავს ცოცხალთა შორის ყველაზე გონიერის - ადამიანის მახასიათებლებს.

ავტომობილში ხმაურთან ეფექტურად საბრძოლველად **smart-ელემენტი** ამოიცნობს სხეულის ვიბრაციას, აანალიზებს მას და ააქტიურებს ვიბრაციის კომპენსაციის მექანიზმს. მაგალითად, პიეზოკერამიკულ ფირფიტებზე[8] მიეწოდება სიგნალი, რაც იწვევს არსებული ვიბრაციის ანტიფაზაში მყოფი სხეულის ხელოვნურ რხევებს და ორი ვიბრაციის ზედდების შედეგად ხმაური ქრება, სურ. 2-ზე ნაჩვენებია ავტომობილის, **smart-ელემენტიანი**, ანტი-ვიბრაციული მეთოდოლოგიის პრინციპული სქემა.



სურათი 2. ავტომობილის ანტი-ვიბრაციული, **smart - ელემენტიანი**, მეთოდოლოგიის პრინციპული სქემა (ინფორმაციის წყარო: Nader M., Irschik H., v. Garßen H.-G. Aktive Schwingungskompensation im Leichtbau mit piezoelektrischen Materialien // Internationales Forum Mechatronik. – Linz, 2006)

ბრაუნშვაიგში (გერმანია) აერო-კოსმოსური კვლევის ცენტრში, კომპოზიტური მასალა შეიქმნა პიეზოკერამიკული ბოჭკოებისგან. ასეთი მასალისგან დამზადებულ ფირფიტას, რომელიც ჩაშენებულია მანქანის ძარაში, ელექტრული ძაბვის მოდებისას, შეუძლია თითქმის მთლიანად შთანთქმას ბგერები და ამით შეასრულოს ფარის როლი, რომელიც საიმედოდ იცავს ავტომობილის სალონს გარე ხმაურისგან. საქმე ისაა, რომ პლასტიურ ფირფიტაში ინტეგრირებული პიეზოკერამიკული ელემენტები ახშობს ბგერით ვიბრაციას, თუ ელექტრო ძაბვა შესაბამისად შეირჩევა. პიეზოკერამიკული ელემენტები უპრობლემოდ შეიძლება ჩაშენდეს ნახშირბადის ბოჭკოების კომპოზიტურ მრავალშრიან მასალაში - უშუალოდ მისი შექმნის პროცესში. ავტომობილის კონსტრუქტორებმა იციან, რომ სალონში ხმაურის ყველაზე დიდი წყარო არ არის გარედან შესული ხმაური, ან ძრავის გუგუნი - არამედ ძარის ვიბრაცია.

უფრო მეტიც, თუ ხმის იზოლაციის ტრადიციულ მეთოდებს კიდევ შეუძლიათ როგორმე გაუმკლავდნენ გარე ხმაურს, ისინი (ხმის იზოლაციის ტრადიციული მეთოდები) უძლურია თავად სხეულის ვიბრაციით გამოწვეული ხმაურის წინააღმდეგ. ხოლო, სხეულის პიეზოკერამიკულ ელემენტებს შეუძლიათ არა მხოლოდ მაღალი სიზუსტით აღმოაჩინონ ასეთი ვიბრაციის წყარო და დაადგინონ მისი პარამეტრები, არამედ ეფექტურად ჩააქრონ ვიბრაციით გამოწვეული ხმაურის წყაროები.

სააქციო ჯგუფის „კარლ შენკის“ (Carl Schenck AG¹³) მკვლევარებმა დარმშტადტში (გერმანია) შემოგვთავაზეს ელექტრორეოლოგიურ სითხეზე დაფუძნებული ორიგინალური კონსტრუქციის ამორტიზატორი. ამორტიზატორი დაფუძნებულია ისეთ სუბსტანციაზე,

¹³ **Carl Schenck AG**, Darmstadt, is a subsidiary of the global technology group DÜRR AG based in Stuttgart, and is Dürr's Measuring and Process Systems (MPS) Division. **As a holding company, Carl Schenck AG performs central tasks for its divisions. World market leaders in balancing and diagnostic systems, assembly and testing systems and filling systems operate under its roof.** The Schenck Technology and Industrial Park operates at the company's headquarters. These divisions generate annual sales revenues in 2017 of approx. €469 million with about 2,200 employees. <https://schenck.net/en/>

რომელსაც აქვს უნარი შეიცვალოს რეოლოგია(სიბლანტე) გარე ელექტრული ველის სიძლიერისა და დიაპაზონის მიხედვით. ამგვარი რეოლოგიური ცვლილება ძალიან ფართოა: დინების უნარის მქონე სითხიდან (გარე ელექტრული ველის არარსებობის შემთხვევაში) ჟელესმაგვარ, თითქმის მყარ კონსისტენციამდე (შესაბამისი დამაბულობისას). ამ შემთხვევაში, სიბლანტის შეცვლის პროცესი მიმდინარეობს ელექტრული ველის სიძლიერის ცვლილების სინქრონულად. ეს უნარი, ელექტრორეოლოგიური სითხეებისა, ადეკვატურად და სწრაფად, შეფერხების გარეშე, გარე პირობებზე რეაგირების საშუალებას იძლევა არასასურველი ვიბრაციების მაღალეფექტური შემცირებისათვის.

„ჭკვიანი“ პიეზოკერამიკა გამოიყენება არა მხოლოდ საავტომობილო, არამედ საავიაციო ინდუსტრიაშიც. თვითმფრინავმშენებლები იყენებენ მას ფრთების ცვლადი პროფილის (გეომეტრიის) შესაქმნელად. ცვლადი პროფილის ფრთა[9] იძენს უნარს ოპტიმალურად მოერგოს ჰაერის ნაკადის აეროდინამიკურ პარამეტრებს, რითაც უზრუნველყოფს თვითმფრინავის წინაშე არსებული ამოცანების უფრო ეფექტურ შესრულებას ფრენის სხვადასხვა ეტაპზე (იხ. სურათი 3). აერო-კოსმოსურ პროგრამებში ვიბრაციის რხევები რთული ამოცანაა, რადგან ვიბრაციათა ამორტიზების მოწყობილობების წონა მაქსიმალურად მსუბუქი უნდა იყოს. შესაბამისი ლიტერატურა აღწერს „ჭკვიანური“ ანუ **smart-მიდგომების** ეფექტურ გამოყენებას ვერტმფრენის ხრახნის ფრთების ვიბრაციის დასაბრუნებლად, არაწრფივი ულტრაბგერითი, პანელის ფლატერის¹⁴, რხევის ჩახშობის მიზნით[10-13].



სურათი 3. ავიაგამანადგურებლის მოდელი მაკრობოჭკვიანი სენსორებითა და (MFC - Macro-Fiber Composite actuator) აქტუატორებით, თვითმფრინავის კუდის სტაბილიზატორებზე [ინფორმაციის წყარო: Mehrabian A.R., Yousefi-Koma A. A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures // Journal of the Franklin Institute. 2011; Vol. 348.]

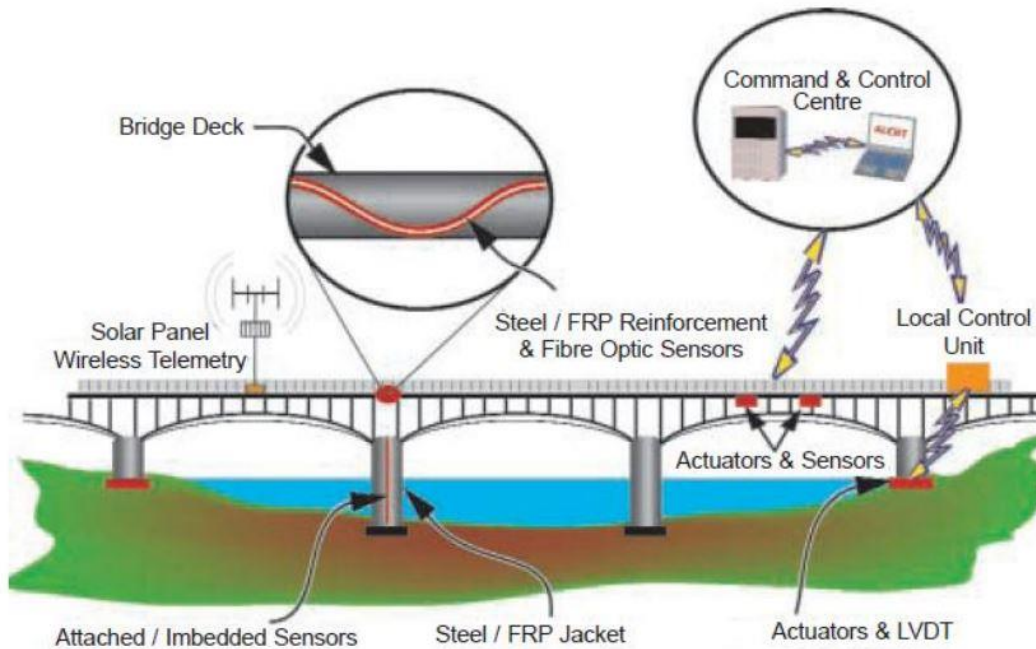
¹⁴ **ფლატერი** (ინგლისურად flutter-დან „კანკალი, ვიბრაცია“) არის თვითმფრინავის სტრუქტურული ელემენტების თვითაღზნებული დაუცველი მოხრისა და ბრუნვითი თვითრხევების ერთობლიობა: აქ რისკი ქვეშაა ძირითადად თვითმფრინავის ფრთა ან ვერტმფრენის როტორი. როგორც წესი, ფლატერი ჩნდება გარკვეული კრიტიკული სიჩქარის მიღწევისას, რაც დამოკიდებულია თვითმფრინავის სტრუქტურის მახასიათებლებზე; შედეგად რეზონანსმა შეიძლება გამოიწვიოს საფრენი აპარატის კორპუსის რღვევა/განადგურება. ზებგერითი სიჩქარეზე გადასვლისას იზრდება ფლატერის საშიშროება.

მუდმივად იზრდება კომპოზიციური მასალების გამოყენება ისეთ რთულ სტრუქტურებში, როგორებიცაა მაღალსიჩქარიანი სამოქალაქო სატრანსპორტო თვითმფრინავები, მრავალჯერადი სატელიტური გამშვებები, კოსმოსური ხომალდები, კოსმოსური კონსტრუქციები, ჯავშანტექნიკა, გემები, ვერტმფრენები, ქარის ტურბინები და სხვა. ერთ-ერთი ფაქტორი, რომელიც ზღუდავს კომპოზიციური მასალების შემდგომ გამოყენებას, არის მათი შედარებით მაღალი მგრძობელობა დაზიანებისადმი და, შესაბამისად, უსაფრთხოებისა და ტექნიკური მომსახურების პრობლემები. მასალათა დაზიანების სხვადასხვა ტიპები, რომელთა მიმართაც მიდრეკილნი არიან კომპოზიტები მოიცავს: განშრევენას, ბოჭკოების მსხვრევას, სითხის შეწოვას, დარტყმით დაზიანებას, მატრიცის რღვევას, სიმტკიცისა და სიხისტის შემცირებას მომატებულ ტემპერატურაზე და დამაბულობათა კონცენტრაციას. ამრიგად, კომპოზიტური მასალები უნდა შემოწმდეს მცირე დაზიანებებზე, სანამ ისინი კატასტროფული გახდება კონსტრუქციისათვის, მათი (ანუ დაზიანებათა) რაოდენობის გაზრდის გამო [14].

კოსმოსური, აერონავიგაციული, მექანიკური, საინჟინრო და საზღვაო კონსტრუქციების დაზიანება ხშირად გამოწვეულია ისეთი ფაქტორებით, როგორიცაა მასალის დაღლილობა, კოროზია და უბედური შემთხვევები. ეს დაზიანებები, თუ დროული ზომებით არ იქნა აღმოფხვრილი, შეიძლება სწრაფად გაიზარდოს - დაზიანების სიახლოვეს დამაბულობისა და დეფორმაციების კონცენტრაციის გამო, რაც იწვევს ვიბრაციის დონის მატებას, დასაშვები დატვირთვის შემცირებას, კონსტრუქციის ელემენტის ნორმალური ფუნქციონირების გაუარესებას და კატასტროფული შედეგების დადგომას. უმეტეს შემთხვევაში, დაზიანებული კომპონენტების სასიცოცხლო ციკლი შეიძლება გახანგრძლივდეს შეკეთების გზით, ნაცვლად პირდაპირი ჩანაცვლებითი - ახლით შეცვლისა. ამიტომ, კონსტრუქციის დაზიანებული ელემენტის ეფექტური შეკეთება მნიშვნელოვანი და გადაუდებელად აქტუალური პრობლემაა. ნახსენები პრობლემების მოგვარება შესაძლებელია კონსტრუქციების ექსპლოატაციის დროის რეალურ რეჟიმში მონიტორინგით და „ჭკვიანი“ მასალების გამოყენებით, რადგან მათ („ჭკვიან“ მასალებს) შეუძლიათ ინფორმაციის მიწოდება, გაზომვის ადგილზე მდებარე სენსორების სისტემით, რეალურ დროში, რაც თავის მხრივ, ქმნის დიაგნოსტიკის ხუთ დონეს [15]:

- 1) ზიანის არსებობის გამოვლენა;
- 2) დაზიანების ადგილის დადგენა;
- 3) ზიანის ოდენობის შეფასება;
- 4) დაზიანების ნაწილობრივი თვითაღდგენის უზრუნველყოფა;
- 5) კონსტრუქციის საექსპლოატაციო რესურსის განსაზღვრა.

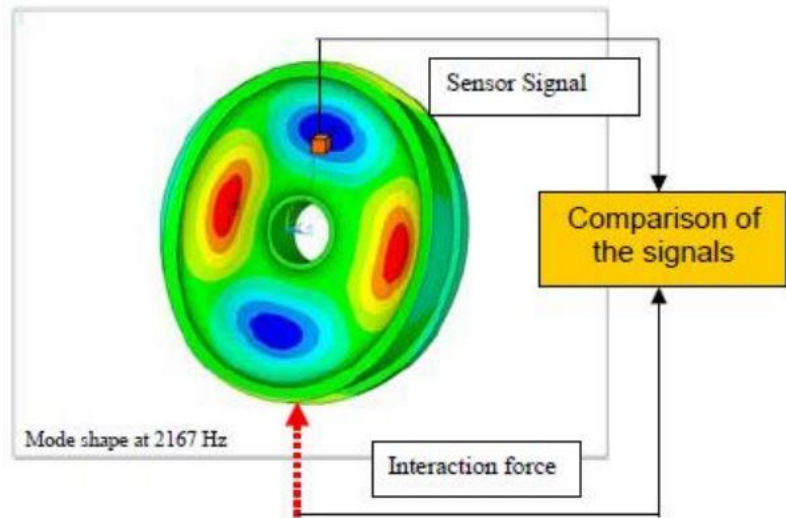
სტრუქტურული დაზიანების არა-დესტრუქციული შეფასებისთვის, როგორც აქტივატორი და სენსორი ეფექტურად გამოიყენება პიეზოკერამიკა (PZT). ამ ტექნიკის უპირატესობა ის არის, რომ მას შეუძლია განახორციელოს უწყვეტი ონლაინ მონიტორინგი და აკონტროლოს მიუწვდომელი ადგილები [16]. ეს ტექნიკა წარმატებით იქნა გამოცდილი კონსტრუქციებზე, როგორცაა ფერმები, რთული კედლების გამაგრება, რკინაბეტონის ხიდები (იხ. სურათი 4.), მილსადენები და კონსტრუქციებში ჭანჭიკებიანი კავშირები [17].



სურათი 4. ინტელექტუალური ხიდი (ინფორმაციის წყარო: Nader M., Irschik H., v. Garßen H.-G. Aktive Schwingungskompensation im Leichtbau mit piezoelektrischen Materialien // Internationales Forum Mechatronik. Linz, 2006.)

ნაშრომში „Wavelet-based active sensing for delamination detection in composite structures“ / H. Sohn, G. Park, J.R. Wait, N.P. Limback, C.R. Farrar // Smart Mater. Struct. 2004. № 13. PP. 153–160. განიხილება სიგნალის დამუშავების მეთოდი კომპოზიტურ სტრუქტურებში განშრევების გამოსავლენად; კერძოდ, კომპოზიტის სტრუქტურის, რეალურ დროში, მონიტორინგის უზრუნველსაყოფად გამოიყენება ტალღების ანალიზის ტექნიკა, რომლის დახმარებით ხდება სენსორული სისტემიდან მომდინარე ინფორმაციის ანალიზი. პიეზოელექტრიკები გამოიყენება სპეციალური ტალღის - ვეივლეტ-ფორმის შეყვანის გზით სიგნალის მისაღებად და საპასუხო სიგნალის გასაზომად. შემდეგ, საპასუხო სიგნალი გადის ტალღის ვეივლეტ-ტრანსფორმაციას და ორიგინალური სიგნალიდან დაზიანებისადმი მგრძნობიარე კომპონენტი ამოღებულია. მეთოდის შესაძლებლობები განიხილება განშრევების მაგალითებზე სხვადასხვა ტემპერატურასა და სასაზღვრო პირობებში. ეს მეთოდები ფართოდ გამოიყენება ხიდების, მნიშვნელოვანი საინჟინრო ნაგებობების (სამრეწველო, ისტორიული ან მაღალსართულიანი შენობები და ა.შ.) ან სეისმურად საშიშ რეგიონებში მდებარე კონსტრუქციების მდგომარეობის მონიტორინგისთვის, აგრეთვე ცალკეული

ობიექტების ხარვეზების გამოსავლენად - დეფექტოსკოპიისათვის, მაგალითად, ამოიკნობს ცვეთას [18] რონოდის (ვაგონის) ბორბლებზე, (იხ. სურ. 5).



სურათი 5. რონოდის(ვაგონის) ბორბლის დეფექტოსკოპია (ინფორმაციის წყარო: Nuffer J., Bein T. Application of piezoelectric materials in transportation industry // Global Symposium on Innovative Solutions for the Advancement of the Transport Industry. 2006. 4–6 October, San Sebastian, Spain. 11 p.)

ძალზე მიმზიდველად გამოიყურება, იმგვარი კონსტრუქციის იდეა, რომელიც ნაწილობრივ „აღადგენს თავს“ მცირე დაზიანების შემთხვევაში, არმატურის დაჭიმვის გააქტიურებისას, წებოს გამოთავისუფლებით ან სხვა გზებით, აღნიშნული ჯერჯერობით დანერგულია ერთ, ძირითადად ლაბორატორიულ აპლიკაციებში.

„თვითგანკურნებადი“ სტრუქტურები უკეთესი საექსპლოატაციო თვისებებით და უფრო ხანგრძლივი მომსახურების სასიცოცხლო ციკლით ხასიათდებიან, ჩვეულებრივ სისტემებთან შედარებით. ამ სისტემების უმეტესობა, როდესაც დაზიანება ხდება, საპასუხოდ დაუყოვნებლივ იწყებს შეკეთება/აღადგენას ამ პროცესის გარე კოორდინაციის გარეშე.

ისტორიულად ჩამოყალიბდა, რომ რეზინებისა და გამხსნელების გაჩენასთან ერთად, დაიწყო თვითდალუქვის მასალების გამოჩენა. ერთ-ერთი ყველაზე ადრეული პატენტი [19] 1896 წლისაა და Mercier-ის საკუთრებაა, რომელმაც შეიმუშავა „თვითაღადგენის“ მასალა კედლის გახვრეტისას.

სითხის კონტეინერების „თვითდახურვის“ ტექნოლოგია განვითარდა სხვადასხვა თანამედროვე სისტემების მოსვლასთან ერთად, რომლებშიც სითხის უკონტროლო გაჟონვა შეიძლება იყოს უკიდურესად საშიში და გამოიწვიოს ექსპლუატაციის შეუძლებლობა ან

თავად სისტემის განადგურება. ესენია, მაგალითად, კოსმოსური და საზღვაო სკაფანდრები, მანქანები და თვითმფრინავები.

კარგად დაპროექტებულ სისტემას შეუძლია გაუმკლავდეს სამუშაო პირობების ფართო სპექტრს, ტიპურ დაზიანებებს და აქვს შესაძლებლობა უზრუნველყოს ადრეული გაფრთხილება კრიტიკული დაზიანების ან კოლაფსის/რღვევის საფრთხის შესახებ. თუმცა, ამ მიდგომას აქვს მთელი რიგი უარყოფითი მხარეები [20]:

- ✓ გამოყენებული სენსორული სისტემა ეყრდნობა შედეგების პროგნოზირებადობას, რაც თავისთავად არის შემზღვეველი ფაქტორი ყველაფერში, გარდა კოსმოსური ტექნოლოგიებისა;
- ✓ თერმოპლასტიკური მასალების დახმარებით თვითაღდგენის განხორციელებული მიდგომა შეზღუდულია პრაქტიკულ გამოყენებაში, რადგან მასალის მთლიანობის აღდგენისას, სტრუქტურა დროებით სუსტდება, გარდა ამისა, საჭიროა კონსტრუქციული ელემენტების ისეთი გეომეტრია, რომ აღმდგენი მასალა ადვილად მოხვდეს დაზიანებულ ადგილებში;
- ✓ ზიანის აღმოჩენის ალგორითმების არასაკმარისი განვითარება: წინასწარ არსებულმა დაზიანებამ შეიძლება საფრთხე შეუქმნას მონიტორინგის სისტემის ძირითად მნიშვნელობებს, ამცირებს დაზიანების აღმოჩენის ალგორითმების ეფექტურობას;
- ✓ დაზიანების გამოვლენის ალგორითმების დროზე დამოკიდებულება; ნელა მზარდი დაზიანებები, როგორცაა მასალის დაღლილობა, დღეისათვის შეუმჩნეველი რჩება, რადგან გამოყენებული მეთოდები ემყარება დაზიანების გამო, მონიტორინგისას, სტრუქტურული მდგომარეობის მრუდის საკმაოდ სწრაფ გადახრას (ეს ანალოგიურია განსხვავებისა მწვავე და ქრონიკულ დაავადებას ან ტკივილს შორის ბიოლოგიურ სისტემებში).

კიდევ ერთი გადაუჭრელი პრობლემა არის **მასშტაბირება**. სენსორების ქსელიდან მომდინარე ინფორმაციის დიდი რაოდენობა შეიძლება გახდეს ისეთი მოცულობის, რომ საჭირო გახდეს სპეციალური მართვა სტრუქტურის თვითაღდგენისათვის. ბიოლოგიურმა სისტემებმა „მოახერხეს“ გაუმკლავდნენ ამ პრობლემას სისტემის იერარქიის დონის დამატების გზით შუალედური ფილტრაციის კვანძების მეშვეობით და სხვადასხვა ფუნქციების დელეგირებით, რომელთაგან თითოეული შეიძლება გამოყენებულ იქნას საინჟინრო სისტემებზე. „**ჰკვიანი, smart მასალების**“ გამოყენება მზარდია და ახლა მისი ნახვა შესაძლებელია საყოფაცხოვრებო აპლიკაციებშიც კი. ახალი თაობის სათხილამურო ტრამპლინებისთვის, ჩოგბურთის ჩოგნისთვის, სნოუბორდისთვის, გოლფისა და ბეისბოლის ჯოხებისთვის, მნიშვნელოვანი ხდება ექსპლოატაციის პერიოდის რხევების შემცირება, რადგან ეს არა მხოლოდ ზრდის

კომფორტს მათი გამოყენების დროს, არამედ საშუალებას იძლევა მიღწეული იქნას უკეთესი შედეგები, არამედ ხელს უშლის რღვევებს ჩამოთვლილი ინვენტარის მასალებში. კომპანია "Head Intelligence" იყო მსოფლიოში პირველი, რომელმაც დაამზადა პიეზობოჭკოსგან ჩოგბურთის ჩოგანი [21]. თუ მანამდე ჩოგნის გამძლეობის გაზრდის ყველა მცდელობა შემოიფარგლებოდა სუფთა მექანიკით და ახალი მასალების "ხრიკებით", აქ იგივეს გულისთვის, დეველოპერებმა პირველად გამოიყენეს ელ. დენი. ასეთი ჩოგნების მთელი საიდუმლო ჩასმულია პიეზოელექტრიკულ ბოჭკოებში (**head intellifibres**), რომელსაც შეუძლია ბურთის მექანიკური ენერჯია ელექტრო იმპულსად გარდაქმნას (ბოჭკოები წარმოქმნიან ელექტროენერჯიას მათი ოდნავი მოხრის ან დეფორმაციის დროს). ამის გამო „ნაპერწკალი“, რომელიც ჩოგნის შემომფარგლავ რგოლს შემოუვლის წამის მეათასედზე ნაკლებ დროში, ჩოგანი ბურთზე დარტყმის მომენტისთვის იძენს დამატებით სიმტკიცეს - აქედან ჩნდება ახალი რეზერვი ჩოგბურთელისათვის, დარტყმის მომატებული ძალა და ასევე - ვიბრაციის სრული არარსებობა. ამგვარი ტექნოლოგიები უკვე გამოცდილია თხილამურებსა და სნოუბორდში. **smart კონსტრუქციის** და **smart მასალების** შემუშავება უდავოდ ხდება ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი ამოცანა მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების მრავალ სფეროში, ისეთში როგორცაა: მიკროელექტრონიკა, კომპიუტერული მეცნიერება, მედიცინა, სიცოცხლის შემსწავლელი მეცნიერებები, ენერჯია, ტრანსპორტი, უსაფრთხოების ინჟინერია და სამხედრო ტექნოლოგიები.

თავის არსში, **smart მასალების** და **smart კონსტრუქციების** ტექნოლოგია საკმაოდ ინტერდისციპლინარული სფეროა, რომელიც მოიცავს ფუნდამენტურ მეცნიერებებს - ფიზიკას, ქიმიას, მექანიკას, კომპიუტერულ ტექნოლოგიებს, ელექტრონიკას, ასევე მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების გამოყენებით დარგებს, ისეთებს, როგორცაა აერონავტიკა და მანქანათმშენებლობა. ამით შეიძლება აიხსნას საკმაოდ ნელი და ფრთხილი პროგრესი ინტელექტუალური კონსტრუქციების პრაქტიკაში გამოსაყენებლად, მიუხედავად იმისა, რომ ამ სფეროში მეცნიერული განვითარება უკვე დიდხანს - თითქმის 30 წელია და ძალიან სწრაფად მიმდინარეობს [22]. „ჭკვიანი მასალებისა“ და მათი ტექნოლოგიების ბაზარი შედარებით ახალგაზრდაა და ჯერ კიდევ ცუდად არის შესწავლილი. თანამედროვე აპლიკაციების უმეტესობა საკმაოდ მარტივია ან ერთმანეთის წარმოებულეა. მაგრამ ეს მასალები იპოვიან უფრო რთულ გამოყენებას და ფართოდ გავრცელდება, როდესაც ტექნოლოგიები საკმარისად განვითარდება და ეს მასალები გახდება ჩვეულებრივი მომწოდებლებისა და მომხმარებლებისთვის. უკვე ვითარდება „ჭკვიანი კონსტრუქციები“, რომლებიც თანდათან შლის განსხვავებას ხელოვნურ ტექნოლოგიებსა და ბუნებას, ცოცხალსა და არაცოცხალს შორის. **თვითმსწავლელი მოწყობილობა** და პროგრამული უზრუნველყოფა შეიმუშავებს საჭირო და სასურველ აპარატურულ საშუალებასა და შესატყვის პროგრამულ უზრუნველყოფას, ანუ უკვე დადგა დრო როცა **ხელოვნური ინტელექტი** ისეთივე საფრთხედ შეიძლება იქცეს, როგორცაა მასობრივი განადგურების იარაღის სხვადასხვა სახეობები.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Concise encyclopedia of composite materials / ed. A. Kelly. – England, 1994. – 350 p.
2. Spillman W.B., Jr., Sirkis J.S., Gardiner P.T. Smart materials, and structures: what are they? // Smart Mater. Struct. 1996; № 5; P. 247–254.
3. Wadhawan V.K. Smart Structures and Materials // Resonance. 2005; № 11; P. 27–41.
4. Wang Z.L., Kang Z.C. Functional and Smart Materials - Structural Evolution and Structure Analysis. New York: Plenum Publish Corporation, 1998; P. 93–149.
5. Concise encyclopedia of composite materials / ed. A. Kelly. – England, 1994. – 350 p.
6. Wadhawan V.K. Smart Structures and Materials // Resonance. 2005; № 11; P. 27–41.
7. polyvinylidene fluoride – PVDF <https://www.britannica.com/science/vinylidene-fluoride>
8. Nader M., Irschik H., v. Garßen H.-G. Aktive Schwingungskompensation im Leichtbau mit piezoelektrischen Materialien // Internationales Forum Mechatronik. – Linz, 2006.
9. Akhras G. Smart materials and smart systems for the future // Canadian Military Journal. 2000. № 3. P. 25–32.
10. Grohmann B., Maucher C., Jänker P. Actuation concepts for morphing helicopter rotor blades // 25th International Congress of the Aeronautical sciences. Canada, 2006. p. 10.
11. Mehrabian A.R., Yousefi-Koma A. A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures // Journal of the Franklin Institute. 2011. Vol. 348. P. 12–23.
12. Recent advances in Eurocopter’s passive and active vibration control / P. Konstanzer, B. Enenkl, P.-A. Aubourg, P. Cranga // 64th Annual Forum of the American Helicopter Society. Canada, Montreal. April 29–May 1, 2008.
13. Sodano H.A. Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation //Ph.D. Thesis. Blacksburg, Virginia, 2003. 151 p.
14. Wavelet-based active sensing for delamination detection in composite structures / H. Sohn, G. Park, J.R. Wait, N.P. Limback, C.R. Farrar // Smart Mater. Struct. 2004. № 13. PP. 153–160.
15. Schulz M.J., Pai P.F., Inman D.J. Health monitoring and active control of composite structures using piezoceramic patches // Composites: Part B. 1999. Vol. 30. P. P. 713–725.
16. Quantitative health monitoring of bolted joints using a piezoceramic actuator–sensor / S. Ritdumrongkul, M. Abe, Y. Fujino, T. Miyashita // Smart Mater. Struct. 2004. № 13. P. 20–29.
17. Qualitative health monitoring of a steel bridge joint via piezoelectric actuator/sensor patches / J.W. Ayres, F. Lalande, C.A. Rogers, Z. Chaudhry // SPIE Nondestructive Evaluation Techniques for Aging Infrastructure & Manufacturing 1996. 3–5 December, Scottsdale. 8 p.
18. Nuffer J., Bein T. Application of piezoelectric materials in transportation industry // Global Symposium on Innovative Solutions for the Advancement of the Transport Industry. 2006. 4–6 October, San Sebastian, Spain. 11 p.
19. Mercier P. Material for protecting vessels, receptacles, &c. / US Patent Specification. 1896. 561905. 3 p.
20. Hurley D.A., Huston D.R. Coordinated sensing and active repair for self-healing // Smart Mater. Struct. 2011.; Vol. 20.; № 2.; 7 p. DOI:10.1088/0964-1726/20/2/025010.

21. Ouellette J. How Smart is Smart Materials? // The Industrial Physicist. 1996. P. 10–13.
22. Lee H.-J., Saravanos D. Layerwise finite elements for smart piezoceramic composite plates in thermal environments // NASA TM-106990 AIAA-96-1277, 1996. 48 p.

For the conceptualization of "smart" constructions and adaptability

Mamuka Matsaberidze¹, Inga Janelidze²

Professor, Faculty of Chemical Technology and Metallurgy of Georgian Technical University

Association Professor, Faculty of Chemical Technology and Metallurgy of Georgian Technical University

Abstract

The article discusses the functional systematology of smart materials, which is a new design philosophy that combines the actions of sensors, actuators, and control element circuits in one system. Smart materials can change their functions depending on changes in the environment. The intelligent construction of smart materials has a number of important advantages compared to traditional ones.

Keywords: smart materials, smart-constructions, intelligent construction, intelligent, adaptive, active, sensitive, metamorphic constructions, materials and systems, flutter, actuators.