CONTROL EDGE | פרק 3
חיישנים ומדידה
מהעולם הפיזיקלי לאות שהבקר יכול לסמוך עליו

שרשרת מדידה, מטרולוגיה, דינמיקה, לולאת זרם תעשייתית, HART ו-IO-Link, התקנה, כיול ודיאגנוסטיקה

קהל יעד	מהנדסי מכונות, תהליך, ייצור, מכשור ובקרה ואינטגרטורים
משך יעד	ארבעים עד ארבעים וארבע דקות
פורמט	שיחה בין יעל - מהנדסת מכונות צעירה, ואמיר - מהנדס תהליך ובקרה ותיק
דוגמה מרכזית	קפיצת טמפרטורה כוזבת בזמן האצת VFD במערכת סחרור
תוצר	תסריט מלא, הנחיה ל-NotebookLM, צ׳קליסט תכן ומקורות

חומר לימודי. אינו מחליף תכן הנדסי, הערכת סיכונים, הוראות יצרן, תוכנית כיול או את המהדורות החוזיות והמחייבות של התקנים הרלוונטיים.

1. בדיקת התאמה לפני הפקה

- הפרק מקיים את הבטחת פרק 2 : הבקר אינו רואה את המכונה אלא אותות, ולכן כעת נבחנת אמינות האות.
- הקהל נשאר מהנדסי מכונות ותהליך; ההסבר מתחיל בפיזיקה ובהתקנה ורק אחר כך עובר לחשמל ולקוד.
- הפרק אינו הופך לקטלוג חיישנים. כל טכנולוגיה מושווית באמצעות עיקרון מדידה, תנאי תהליך ומצבי כשל.
- מונחי מטרולוגיה מוצגים בזהירות ובהתאם ל-VIM ול-GUM, בלי להפוך את הפרק לקורס מעבדה.
- הדיון ב-SIL, Machine Safety ו-Ex נשאר ברמת גבולות ואחריות; חישובים מפורטים יופיעו בפרקים ייעודיים.
- הסיום מוביל ישירות לפרק 4 על מפעילים, שסתומים, Solenoids והמרת פקודת תוכנה לפעולה פיזיקלית.

בדיקת עדכניות

ביוני 2026 פורסמו מהדורות חדשות של IEC 61298-1/-2/-3 ושל IEC 62828-1. הפרק משתמש במפת התחולה המעודכנת: IEC 62828 למשדרי מדידה תעשייתיים ותהליכיים, ו-IEC 61298 למכשור תהליך אחר בתחום התקן.

2. מטרות הפרק

- להסביר את שרשרת המדידה המלאה מהגודל הנמדד ואלמנט החישה ועד לערך, מצב האיכות וחותמת הזמן בבקר.
- להבחין בין דיוק, חזרתיות, היסטרזיס, ליניאריות, סחיפה, רזולוציה, כיול ואי-ודאות.
- לחבר בין מפרט סטטי לבין זמן תגובה, רוחב פס, קצב דגימה, סינון והשהיה כוללת.
- להשוות עקרונות מדידה נפוצים ללחץ, טמפרטורה, ספיקה, מפלס, נוכחות, מיקום, כוח ורעידות.

- להסביר אותות בדידים, פולסים, מתח, לולאת זרם, HART ו-IO-Link בלי להציג פתרון אחד כאוניברסלי.
- לזהות שגיאות התקנה הנובעות מצינוריות, בתי חיישן, חיבור מכני, מסלול כבלים, סיכוך, הארקה ובידוד.
- לתכנן דיאגנוסטיקה, מצב איכות, רשומות כיול ותגובה למצבי כשל.
- להכיר את הגבול בין מדידה רגילה, מכשור בטיחות ותכן לאזור מסוכן.

3. חלוקת זמן ומקטעים

זמן	מקטע	מטרה
00:00-02:30	פתיחה: הטמפרטורה עוקבת אחרי ה-VFD	להראות שאות חלק אינו בהכרח אות אמיתי.
02:30-06:00	שרשרת המדידה	להגדיר Measurand, חישה, עיבוד, הולכה, I/O ומשמעות.
06:00-10:30	שפת המטרולוגיה	להפריד Accuracy, Repeatability, Uncertainty, Calibration ו-Verification.
10:30-15:30	אמת דינמית	לחבר Response, Bandwidth, Sampling, Aliasing ו-Filtering.
15:30-20:30	חיישני תהליך	להשוות לחץ, טמפרטורה, ספיקה ומפלס.
20:30-25:30	חיישני מכונה	להשוות נוכחות, מיקום, כוח, משקל ומצב.
25:30-30:00	ממשקי אות	להסביר Discrete, Pulse, Voltage, 4-20 mA, HART ו-IO-Link.
30:00-34:30	התקנה ושלמות אות	לעבור על הארקה, Shield, Isolation, Scaling ותזמון.
34:30-38:30	כיול ודיאגנוסטיקה	לתכנן Quality, ראיות תחזוקה ותגובה לכשל.
38:30-41:30	בטיחות ואזור מסוכן	להגדיר את גבולות IEC 61511 ו- IEC 60079.
41:30-44:00	פתרון וצ׳קליסט	לפתור את התקלה ולהכין את פרק המפעילים.

4. מפת שרשרת המדידה

הטבלה נועדה למנוע את הטעות שבה מתייחסים ל-Accuracy של החיישן כאל ביצועי המדידה הכוללים.

שלב	החלטה הנדסית	כשל אופייני
1 . מטרה ו-Measurand	להגדיר גודל, מיקום, מצב תפעולי ולמה נדרש הערך.	"טמפרטורת מיכל" עמומה; מדידת דופן במקום Bulk Liquid.
2 . אלמנט וחיבור לתהליך	לבחור עיקרון, חיבור, חומרים	Coating, סתימה, החדרה קצרה,

כשל אופייני	החלטה הנדסית	שלב
רעידות, Side Load, קורוזיה.	והגנה מתאימים.	
שגוי Sensor Type, פילטר מוגזם, Configuration Drift, הזנה.	עירור, הגברה, פיצוי, ליניאריזציה, Damping ודיאגנוסטיקה.	3 . עיבוד ומשדר
Voltage Drop, EMI, Ground Loop, Shield שגוי, נתון Stale.	להעביר אות עם התנהגות חשמלית, תזמון ו-Quality ידועים.	4 . הולכה וחיווט
טווח שגוי, Aliasing, רזולוציה נמוכה, Update לא עקבי.	לקלוט, לבודד, לדגום, לחתום זמן ולבצע Scaling.	5. I/O והמרה
מחיקת Fault Codes ב-Clamp, יחידות שגויות, Frozen Value.	יחידות, Quality, Plausibility, Alarm, Control ו-Historian.	6 . Validation ושימוש
אין As-found, Spare לא מוגדר, שינוי לא מתועד.	לכייל, לאמת, לתחזק, להחליף ולבחון OOT.	7 . ראיות מחזור חיים

5. מפת בחירת טכנולוגיית חישה

דוגמאות יצרנים רלוונטיים כוללות, ללא דירוג: Endress+Hauser, Emerson/Rosemount, Siemens, Yokogawa, Honeywell, VEGA ו-WIKA בעולם התהליך; SICK, ifm, Balluff, Pepperl+Fuchs, Keyence, Omron, Banner ו-Turck בעולם המכונות. בחירה מתבצעת לפי דרישה, תקינה, שירות מקומי ומחזור חיים - לא לפי לוגו.

משתנה	עקרונות נפוצים	שאלות בחירה
לחץ	אלמנטים; Gauge, Absolute, Differential Piezoresistive, Capacitive או Resonant.	סוג לחץ, Overpressure, Pulsation, Impulse Lines, Seals, חומרים והפרשי גובה.
טמפרטורה	RTD, Thermocouple, Thermistor, Semiconductor, Infrared.	טווח, תגובה, החדרה, Thermowell, פיצוי מוליכים, Cold Junction ו-Emissivity.
ספיקה	DP, Magnetic, Coriolis, Vortex, Ultrasonic, Turbine, Thermal.	תכונות נוזל, מוליכות, צפיפות, Straight Run, הפסד לחץ, Two-phase ו-Turndown.
מפלס	Hydrostatic, Radar, Guided Wave, Ultrasonic, Capacitance, Point Switch.	צפיפות, אדים, קצף, Coating, מבנים פנימיים, Dead Zone, Interface ו-Nozzle.
נוכחות ומרחק	Inductive, Capacitive, Photoelectric, Ultrasonic, Magnetic, Limit Switch.	חומר מטרה, צבע, ברק, אבק, לחות, זווית, רקע, התקנה וקצב מחזור.
מיקום ומהירות	Incremental/Absolute Encoder, Resolver, Linear Scale, LVDT, Laser.	מול Resolution, Homing, Accuracy, Coupling, Backlash, Update, Cable ומהירות.
כוח, משקל ומומנט	Strain Gauge, Piezoelectric, Hydraulic,	Load Path, Side Load, Preload,

שאלות בחירה	עקרונות נפוצים	משתנה
טמפרטורה, Overload וקשיחות מסגרת.	Pneumatic, Magnetoelastic.	
חיבור מכני, Bandwidth, Sampling, Baseline ומשמעות האלגוריתם.	Acceleration, Velocity, Displacement, Acoustic, Temperature, Current Signature.	Condition Monitoring

אזהרה הנדסית

אין "חיישן מדויק" ללא הקשר. יש שרשרת מדידה שעומדת בדרישת אי-ודאות, תגובה, סביבה, אבחון ותחזוקה בתנאי שימוש מוגדרים.

6. הנחיה מוכנה ל-NotebookLM

הנחיה מוכנה להדבקה

צור פרק פודקאסט בעברית בלבד באורך 44 - 40 דקות, המבוסס אך ורק על מסמך זה.

שני מגישים:
- יעל: מהנדסת מכונות צעירה, חדה וסקרנית. היא מייצגת מהנדסי מכונות ותהליך שאינם מומחי מכשור. היא שואלת שאלות קונקרטיות, בוחנת הנחות ומחברת את המדידה להתקנה המכנית.
- אמיר: מהנדס תהליך ובקרה ותיק, רגוע ומעשי. הוא מסביר מתוך ניסיון בהקמה, Commissioning, תפעול וחקירת תקלות, בלי להתנשא.

סגנון:
- שיחה טבעית, מקצועית ומדויקת, לא הרצאה מוקראת ולא פרסומת.
- חלוקת דיבור של כ-45% יעל ו-55% אמיר.
- להשתמש בדוגמת קפיצת הטמפרטורה בזמן האצת VFD כחוט מקשר ולפתור אותה רק בסיום.
- להסביר כל מונח באנגלית בפעם הראשונה בעברית פשוטה, ואז להשתמש בו באופן עקבי.
- להשאיר השהיות קצרות אחרי הסבר Accuracy לעומת Repeatability, אחרי Aliasing, ואחרי צ'קליסט התקלה.
- לא להקריא כתובות אינטרנט, מספרי סעיפים או רשימת מקורות. להזכיר תקנים רק כשהם מסבירים אחריות הנדסית.
- לא להמציא ערכי דיוק, טווחי כשל או דרישות SIL. כל מספר בדוגמה הוא המחשה בלבד.
- לא לטעון ש-IO-Link הוא Fieldbus, ש-HART מחליף את 0-20-4 mA, או שכיול בהכרח כולל Adjustment.
- לסיים בהכנה ברורה לפרק 4 על מפעילים ושסתומים.

מבנה חובה:
פתיחה עם התקלה; שרשרת המדידה; מטרולוגיה; תגובה דינמית; חיישני תהליך; חיישני מכונה; ממשקי אות; התקנה ו-EMC; כיול ודיאגנוסטיקה; בטיחות ו-Ex; פתרון וצ'קליסט.

השתמש בתסריט המלא כמסגרת מחייבת, אך אפשר קטעי תגובה טבעיים קצרים שאינם משנים עובדות.

7. תסריט מלא לפרק

00:00-02:30 | פתיחה - הטמפרטורה שעוקבת אחרי ה-VFD

אמיר: מערכת סחרור עובדת ביציבות על שלושים ושתיים מעלות. ה-VFD של המשאבה מתחיל להאיץ, ופתאום משדר הטמפרטורה קופץ לשלושים ושבע. אחרי חמש שניות הוא חוזר. מהנדס התהליך מאשים את החימום, מהנדסת המכונות חושדת בערבול, ואיש הבקרה מוסיף פילטר. הגרף נהיה חלק.

יעל: זה נשמע כמו תיקון מוצלח, חוץ מהעובדה שהנוזל כנראה לא התחמם בחמש מעלות בשנייה.

אמיר: בדיוק. שקר חלק הוא עדיין שקר. הקפיצה יכולה להגיע מצימוד אלקטרומגנטי, הארקה, כבל Thermocouple שמונח ליד כבל מנוע, Common Mode, טווח שגוי במודול הקלט או אפילו רעידות של הגשש. פילטר יכול להסתיר את הסימפטום וגם להוסיף השהיה לחוג.

יעל: אז היום לא נשאל רק איזה חיישן מודד טמפרטורה, אלא כיצד הגודל הפיזיקלי הופך למספר שהבקר יכול לסמוך עליו.

אמיר: זה הפרק: חיישנים, משדרים, חיווט, Sampling, כיול, דיאגנוסטיקה והתקנה. הבקר של פרק 2 אינו רואה לחץ או מיקום. הוא מקבל ייצוג חשמלי או דיגיטלי שיש לו היסטוריה, רוחב פס ומצבי כשל.

יעל: וכלל הפתיחה: תוכנה אינה יכולה להציל שרשרת מדידה שאיננו מבינים.

אמיר: נעקוב אחרי האות מהתהליך ועד לקוד.

02:30-06:00 | שרשרת המדידה, לא רק החיישן

יעל: משתמשים במילים Sensor, Transducer ו-Transmitter כאילו הן זהות. איך נכון לחשוב עליהן?

אמיר: מתחילים ב-Measurand - הגודל שאנו מתכוונים למדוד. למשל לחץ בנקודה מוגדרת, מיקום ציר, טמפרטורת נוזל בעומק מסוים, ספיקת מסה, תאוצת רעידה או נוכחות פקק. האלמנט הראשוני מגיב לגודל. מנגנון ההמרה הופך את התגובה להתנגדות, מתח, קיבול, תדר או תזוזה. לאחר מכן Signal Conditioning מבצע עירור, הגברה, ליניאריזציה, פיצוי והמרה.

יעל: ו-Transmitter אורז חלק מהפונקציות ושולח אות סטנדרטי.

אמיר: נכון. משדר לחץ יכול לכלול דיאפרגמה, גשר מדידה, פיצוי טמפרטורה, מעבד, דיאגנוסטיקה ו- 0 2 - 4 mA עם HART. חיישן השראתי פשוט נותן רק On-Off. Encoder נותן פולסים או מילת מיקום. הגבולות משתנים, ולכן האובייקט ההנדסי הוא שרשרת המדידה השלמה.

יעל: השרשרת היא: גודל פיזיקלי, חיבור לתהליך, אלמנט חישה, עיבוד, הולכה, מודול I/O, Scaling ליחידות, Validation, חותמת זמן ולבסוף הלוגיקה.

אמיר: ולהוסיף לכל בלוק את ההתקנה והסביבה. משדר לחץ מכויל יכול לדווח ערך שגוי בגלל Impulse Line סתום. Thermocouple יכול להיות תקין אך ה-Thermowell מודד את דופן המיכל. Encoder יכול לספור מצוין בזמן שהצימוד מחליק.

יעל: כלומר מיקום המדידה הוא חלק מהמפרט.

אמיר: בהחלט. "טמפרטורת המיכל" אינה דרישה מספקת. באיזה גובה, עומק, מצב זרימה וזמן תגובה? האם הערך לבקרה, להגנה, למאזן אנרגיה או לתיעוד איכות? מטרת המדידה מכתיבה את הארכיטקטורה.

יעל: תג P&ID כמו PT מזהה Pressure Transmitter, אבל לא מספר את כל הסיפור.

אמיר: נכון. ISA-5.1 נותן שפה משותפת לסמלים וזיהוי. Instrument Index, Data Sheet, Loop Drawing, I/O List ו-Cause and Effect משלימים את המידע.

06:00-10:30 | דיוק, חזרתיות ואי-ודאות

יעל: בקטלוג כתוב Accuracy של פלוס מינוס 0.1%. מה זה מבטיח?

אמיר: לא מספיק. אחוז ממה - Span מכויל, Full Scale, Reading או Upper Range Limit? באילו תנאי ייחוס? מה השפעת טמפרטורה, לחץ סטטי, זמן, תנוחת התקנה, מתח הזנה ורזולוציה? והאם הנתון טיפוסי או מובטח?

יעל: איך מפרידים בין Accuracy ל-Precision בלי שיעור מטרולוגיה שלם?

אמיר: דמייני מטרה. Precision מתאר כמה המדידות החוזרות צפופות זו לזו. מכשיר יכול להיות מדויק מאוד בחזרתיות ולהחטיא תמיד לאותו צד. Trueness קשור לקרבת הממוצע לערך ייחוס. במפרטים מסחריים משתמשים במילה Accuracy כגבול שגיאה משולב, ולכן קוראים את ההגדרה של היצרן ולא מניחים נוסחה אחת.

יעל: Repeatability היא הפיזור באותם תנאים ובזמן קצר.

אמיר: כן. Reproducibility מתייחסת לתנאים משתנים. Hysteresis פירושו שהקריאה תלויה בכיוון שממנו הגענו לנקודה. Linearity היא הסטייה מקשר נבחר. Drift הוא שינוי לאורך זמן. Resolution היא השינוי הקטן שהמערכת מסוגלת להציג או להבחין בו, אבל הרבה ספרות אחרי הנקודה אינן הוכחה לדיוק.

יעל: ומהי Measurement Uncertainty?

אמיר: אי-ודאות מאפיינת את פיזור הערכים הסבירים שניתן לייחס ל-Measurand לפי מודל המדידה והמידע הזמין. היא שייכת לתוצאת המדידה, לא רק לחיישן. התקציב יכול לכלול Reference, משדר, טמפרטורת סביבה, התקנה, כרטיס אנלוגי, Scaling, חזרתיות ושונות בתהליך.

יעל: כיול אינו מוחק את אי-הוודאות.

אמיר: נכון. Calibration קובע קשר בין ערכי ייחוס לבין הקריאות, כולל אי-ודאות. Adjustment הוא שינוי במכשיר. Verification בודק עמידה בדרישה. בשטח אומרים "לכייל" ומתכוונים לעיתים לשלושה דברים שונים.

יעל: דוגמה מעשית?

אמיר: משדר Differential Pressure בטווח אפס עד מאה קילו-פסקל יכול להיות מצוין במעבדה, אבל בשטח יש שתי צינוריות ארוכות, צד אחד מתחמם בשמש ויש Zero Shift מתנוחת התקנה. ביצועי השדה נשלטים על ידי ההתקנה, לא האלקטרוניקה.

יעל: וגם טווח גדול מדי פוגע. אם התהליך משתמש בעשרה אחוז מה-Span, השגיאה ביחס לקריאה גדלה.

אמיר: לכן בוחרים טווח עם מרווח הפרעה אמין, לא את הטווח הגדול ביותר בקטלוג.

יעל: אפשר להראות במספרים למה אחוז מה-Span משנה?

אמיר: ניקח משדר בטווח אפס עד מאתיים מעלות. Span הזרם הוא שישה-עשר מיליאמפר, ולכן במאה מעלות הזרם האידיאלי הוא 12 mA. אם שגיאת הלולאה היא 0.2% מה-Span, מדובר ב-0.4 מעלות בטווח המוגדר. אבל אם משאירים את אותו משדר בטווח אפס עד אלף מעלות והתהליך עובד סביב מאה, אותו אחוז מייצג שתי מעלות. החומרה לא הורעה; התכן בזבז את הביצועים.

יעל: וגם לכרטיס האנלוגי יש שגיאת המרה ו-Temperature Drift.

אמיר: נכון, וגם ל-Reference של הכיול. לכן Loop Calibration עשוי להיות חשוב יותר מכיול של האלמנט בלבד. בבדיקת לולאה מגרה את הקלט הפיזיקלי או החשמלי ומוודאים את הערך במקום שבו מערכת הבקרה משתמשת בו. כך מגלים Wiring, Scaling ו-Configuration שלא יופיעו בתעודת מעבדה של החיישן.

10:30-15:30 | מפרט סטטי ואמת דינמית

יעל: חיישן יכול להיות מצוין ב-Steady State ולא מתאים לבקרה.

אמיר: נכון. צריך Response Time, Time Constant, Rise Time, Settling Time, Bandwidth, Dead Time ו-Update Period. אלה מושגים קשורים אך אינם זהים.

יעל: ניקח Thermowell.

אמיר: אלמנט RTD קטן יכול להיות מהיר, אבל בתוך Thermowell עבה ובנוזל איטי זמן התגובה יכול להיות עשרות שניות. המשדר מעדכן כל מאה מילישניות, אך ההרכבה הפיזיקלית עדיין איטית. תוכנה אינה מחזירה מידע שהמכניקה לא קלטה.

יעל: וברעידות קורה ההפך: כרטיס Process איטי יכול למצע את התדרים החשובים.

אמיר: בדיוק. ברעידות, Acoustic Emission או Registration מהיר, כל השרשרת צריכה Bandwidth מתאים: חיישן, חיבור מכני, כבל, Conditioner, Anti-alias Filter, Sample Rate, תקשורת ואלגוריתם. Sampling מעל פי שניים מהתדר הגבוה הוא מינימום תיאורטי לאות מוגבל-פס; מערכת מעשית צריכה פילטר ומרווח.

יעל: Aliasing גורם לתדר גבוה להיראות כמו תדר נמוך שקרי.

אמיר: כן, והוא לא נעלם במיצוע אחרי הדגימה. הפילטר צריך לפעול לפני ההמרה הדיגיטלית. גם Debounce מוגזם על מתג יכול להעלים אירוע מהיר.

יעל: כל פילטר קונה חלקות במחיר.

אמיר: לרוב במחיר השהיה והנחתה. Low-pass מוסיף Phase Lag, שמקטין Stability Margin בחוג ועלול לעכב Alarm. בוחרים פילטר לפי רוחב הפס וזמן התגובה הנדרש, לא כדי שה-Trend ייראה יפה.

יעל: גם Damping במשדר חכם הוא חלק מהשרשרת.

אמיר: בהחלט. יכול להיות Damping בחיישן, במשדר, בכרטיס, בקוד, ב-HMI וב-Historian. הצטברות של כמה פילטרים יוצרת מערכת רגועה שמגיבה מאוחר.

יעל: לכן במסמך החוג כדאי לתעד גם Update Time ו-Damping.

אמיר: וביישומים מהירים גם את מקור חותמת הזמן. ערך שהגיע עכשיו יכול לייצג מדידה שנלכדה קודם.

15:30-20:30 | לחץ, טמפרטורה, ספיקה ומפלס

יעל: נעבור על משתני התהליך בלי להכתיר טכנולוגיה אחת כמנצחת.

אמיר: בלחץ מחליטים קודם Gauge, Absolute או Differential. אחר כך טווח, Overpressure, טמפרטורת תהליך, חומרים רטובים, Pulsation, Vacuum, השפעת לחץ סטטי וחיבור מכני. ב-DP, צינוריות, Seals והפרשי גובה יכולים ליצור יותר שגיאה מהמשדר.

יעל: Remote Seal פותר בידוד מהתהליך, אבל מוסיף השפעת Fill Fluid וזמן תגובה.

אמיר: נכון. בטמפרטורה, RTD נותן מדידת התנגדות יציבה ונמצא תחת IEC 60751. Thermocouple מתאים לטווחים רחבים וגבוהים ונמצא תחת IEC 60584, אך דורש סגסוגת, Extension Cable ו-Cold Junction נכונים.

יעל: חיבור RTD של שניים, שלושה או ארבעה חוטים משנה את השפעת התנגדות המוליכים.

אמיר: כן. ארבעה חוטים מפרידים בצורה הטובה ביותר, שלושה מפצים תחת הנחות, ושניים כוללים את התנגדות החוט. עדיין צריך עומק החדרה, קוטר Sheath, רעידות, הולכת חום ותחזוקתיות.

יעל: בספיקה הבחירה תלויה מאוד בתכונות הנוזל.

אמיר: DP מוכר ורב-שימושי אך יוצר הפסד לחץ ותלוי בצפיפות. Magnetic דורש מוליכות ומגע אלקטרודות תקין. Coriolis מודד מסה וצפיפות, אך יקר ורגיש לעומסי צנרת או Two-phase. Vortex תלוי בתנאי זרימה ויכול להיפגע מרעידות. Ultrasonic תלוי בגיאומטריה, במצב הנוזל ובנתיב האקוסטי.

יעל: ובמפלס?

אמיר: Hydrostatic תלוי בצפיפות ובלחץ אדים. Radar יכול להיות ללא מגע אך מושפע ממיקום אנטנה, מבנים פנימיים, קצף ותכונות דיאלקטריות. Guided Wave מתקדם על Capacitance, Ultrasonic. Probe ו- Point Switch מתאימים למדיות אחרות.

יעל: השאלה המאחדת היא איזה עיקרון פיזיקלי נשאר תקף בתהליך שלנו.

אמיר: בדיוק. מוסיפים ניקוי, ציפוי, התגבשות, בועות, מוצקים, צמיגות, מוליכות, קורוזיה, דרישות היגייניות וגישה לתחזוקה.

יעל: לא הזכרנו מדידות אנליטיות כמו pH, מוליכות, חמצן מומס או הרכב גז.

אמיר: הן ראויות לפרק נפרד כי האלמנט מגיב כימית לתהליך. Sample Conditioning, פיצוי טמפרטורה, זרימה דרך האנלייזר, מצב ממברנה או אלקטרודה, זיהום ותמיסות כיול יכולים לשלוט בביצועים. מערכת Analyzer היא לעיתים מפעל תהליך קטן: לקיחת דגימה, הורדת לחץ, קירור, סינון, זמן הובלה ופינוי.

יעל: כלומר צינור הדגימה יוצר Dead Time. הערך יכול להיות מדויק לדגימה שעזבה את התהליך לפני כמה דקות.

אמיר: בדיוק. הבקר צריך לדעת את זמן ההובלה ואת ה-Quality. עדכון דיגיטלי מהיר מארון האנלייזר אינו הופך את הדגימה לעכשווית. אותו עיקרון חל על תוצאת מעבדה שמוזנת ידנית: חותמת הזמן החשובה היא זמן לקיחת הדגימה, לא רק זמן ההקלדה.

20:30-25:30 | חישה במכונות: נוכחות, מיקום, כוח ומצב

יעל: במכונות רואים Inductive, Capacitive, Photoelectric, Ultrasonic, Magnetic ו-Encoders.

אמיר: Inductive מצוין למתכת, אבל טווח החישה תלוי בחומר המטרה, גודל, Flush Mount והסביבה. Capacitive מזהה גם לא-מתכות, אך לחות והצטברות מזיזות Threshold. Photoelectric נותן טווח ואופטיקה גמישים, אך צבע, ברק, אבק, יישור ורקע משפיעים. Ultrasonic פחות תלוי בצבע, אבל תלוי בהחזר קול, Dead Zone, תנאי אוויר וזווית מטרה.

יעל: Limit Switch מכני הוא טכנולוגיה ותיקה אך לפעמים הפתרון הברור.

אמיר: נכון, כל עוד Life, Bounce, מהירות, אטימה ובלאי מתאימים. לא בוחרים לפי "ישן מול חכם" אלא לפי מצבי הכשל והפונקציה.

יעל: Incremental Encoder לעומת Absolute?

אמיר: Incremental נותן פולסים וכיוון, והבקר בונה מיקום מספירה וצריך Reference אחרי אובדן מתח. Absolute נותן קוד מיקום, Single-turn או Multi-turn. אבל Absolute אינו מבטל החלקת צימוד, Backlash, אקסצנטריות או אובדן ייחוס מכני.

יעל: Resolution היא Counts per Revolution, אך Accuracy כוללת שגיאות חלוקה והרכבה.

אמיר: נכון. מגדירים גם מהירות מרבית, ממשק, Update, אורך כבל, חסינות רעש ודרישות Motion Safety.

יעל: ב-Load Cell מסלול הכוח הוא חלק מהמדידה.

אמיר: לחלוטין. Side Load, Binding, Gradient טמפרטורה, Preload, Torque התקנה ומגן הכבל יכולים לשלוט בשגיאה. חיישן מכויל על שולחן עלול לטעות כשהמסגרת מתעוותת.

יעל: וב-Vibration צריך לדעת מהו Health Number.

אמיר: כן. האם זה RMS Velocity, תאוצה, Envelope, טמפרטורה או מודל ספק? באיזה תחום תדר ובאיזה חלון זמן? דיאגנוסטיקה חכמה מועילה רק כשהמשמעות ידועה.

25:30-30:00 | ממגע יבש ועד HART ו-IO-Link

יעל: נתחיל באות דיסקרטי.

אמיר: חיישן יכול להיות Dry Contact, PNP, NPN או שני-חוטי. הכרטיס חייב להתאים למתח, זרם, קוטביות, Leakage ודיאגנוסטיקה. Bit של On אינו משמעותי עד שמגדירים איזה מצב חשמלי ופיזיקלי הוא מייצג.

יעל: אות מתח פשוט, אבל רגיש ל-Voltage Drop ולהבדלי Reference במרחק.

אמיר: לכן 0 - 2 - 4 mA נפוץ בתהליך. הערך מיוצג בזרם, ו- 4 mA הוא Live Zero שמאפשר להבחין בין אפס תקין לבין חלק מתקלות המעגל. אבל לא כל תקלה מזוהה אוטומטית.

יעל: NAMUR NE 43 עוסק בסימוני כשל למשדרים דיגיטליים עם יציאה אנלוגית.

אמיר: נכון. הוא מסדיר שימוש ברמות מחוץ לטווח המדידה הרגיל כדי לאפשר זיהוי כשל. צריך להגדיר יחד משדר, Isolator, כרטיס ולוגיקה. Clamp אוטומטי לאפס עד מאה אחוז יכול למחוק את מידע התקלה.

יעל: HART שומר את הערך האנלוגי ומוסיף תקשורת דיגיטלית על אותם חוטים.

אמיר: בדיוק. HART מוסיף FSK דו-כיווני על לולאת 0 - 2 - 4 mA ומעביר זיהוי, הגדרות, Diagnostics ומשתנים נוספים. אבל המערכת צריכה לאסוף ולהשתמש במידע; כרטיס אנלוגי פשוט לא מנצל אותו.

יעל: IO-Link נפוץ יותר ליד מכונות.

אמיר: IEC 61131-9 מגדיר את SDCI המוכר כ-IO-Link: תקשורת Point-to-point עם Process Data, פרמטרים, זיהוי ודיאגנוסטיקה. זה אינו Fieldbus; ה-Master מחבר את ההתקנים לרשת העליונה.

יעל: אפשר להחליף חיישן ולהוריד פרמטרים אוטומטית, אבל צריך לנהל זהות וגרסאות.

אמיר: וגם הרשאות. מי רשאי לשנות Threshold? מה מגובה? מה קורה ב-Device Revision חדש? Smart אינו Self-governing.

יעל: גם Pulse ו-Frequency עדיין חשובים.

אמיר: נכון. מגדירים Pulse Width, תדר מרבי, ממשק חשמלי, זיהוי Missed Pulse, Counter Rollover ו- Time Base.

30:00-34:30 | שלמות אות, התקנה ודגימה

יעל: נחזור לקפיצת הטמפרטורה בזמן האצת ה-VFD. מה בודקים לפני קוד?

אמיר: קודם האם השינוי פיזיקלי אפשרי לפי מסה, קיבול חום והספק, ורצוי מדידה עצמאית. אחר כך מסלול כבלים, Shield, הארקה, הפרדה מכבלי מנוע, Junctions, סוג Extension Wire, מתח משדר, Isolation ו-Common Mode. בודקים באיזה שלב הקפיצה נכנסת.

יעל: "להאריק Shield בצד אחד" נאמר לפעמים כחוק אוניברסלי.

אמיר: זו תבנית שימושית בחלק ממערכות Analog בתדר נמוך, לא חוק. השיטה תלויה בכבל, תדר, Equipotential Bonding, הוראות יצרן, אזור מסוכן וארכיטקטורת EMC. פועלים לפי תכן, לא לפי פולקלור.

יעל: מה תפקיד IEC 61326?

אמיר: התקן מגדיר דרישות EMC לציוד מדידה ובקרה. תאימות מוצר חשובה, אך התקנת המערכת קובעת צימוד, חשיפה והארקה. משדר ו-VFD תואמים יכולים עדיין להיות מותקנים יחד בצורה גרועה.

יעל: Isolation יכול לשבור Ground Loop, אבל יש לו גבולות.

אמיר: כן. מגדירים בידוד בין ערוצים ולאדמה, מתח עבודה, Surge, השפעה על Accuracy ומצב כשל. באזור מסוכן, Barrier או Isolator חייבים להתאים לתכן Intrinsic Safety המלא.

יעל: ובקוד - Scaling.

אמיר: לא מפזרים חישובים בכל התוכנית. מגדירים Raw Range, Engineering Range, Under-range, Over-range, Quality ויחידות בבלוק אחד. שומרים Raw לדיאגנוסטיקה. בודקים Plausibility ו-Rate of Change כשיש הצדקה, אבל לא מחליפים תקלה בערך משוער בלי Degraded Mode מוגדר.

יעל: Sample Rate צריך להתאים לפיזיקה.

אמיר: כן. טמפרטורה יכולה להסתפק בקצב נמוך, Registration ורעידות דורשים גבוה. מהיר יותר אינו תמיד טוב: הוא מגדיל רעש, עומס נתונים ועיבוד. צריך Bandwidth מספיק, Latency ידוע ותזמון עקבי.

יעל: וגם Trend אינו בהכרח קצב הדגימה.

אמיר: נכון. HMI יכול לצייר פעם בשנייה ערך שנדגם כל 10 ms, או לדגום באמת פעם בשנייה. Historian Compression יכול למחוק אירועים קצרים. בזמן חקירה צריך להכיר כל שלב.

יעל: איפה Loop Check נגמר ו-Functional Test מתחיל?

אמיר: Loop Check מוכיח את המסלול: קלט שדה, חיווט, Marshalling, I/O, Scaling, תצוגה ולעיתים גם פקודה חזרה לשדה. Functional Test מוכיח את ההתנהגות: Alarm בתנאי הנכון, Interlock, Voting, Permissive, Fallback והודעת מפעיל. צריך את שניהם, כי אפשר להציג ערך נכון בזמן ש-Tag אחר מפעיל את הלוגיקה.

יעל: לכן גם Force בזמן Commissioning חייב להיות מנוהל.

אמיר: בהחלט. Forces ו-Simulations צריכים להיות מאושרים, גלויים, מתועדים ומוסרים. Force שנשכח הופך חיישן מושלם ללא רלוונטי. בדוח ההפעלה צריך לציין מה נבדק בגירוי תהליך אמיתי ומה בסימולציה.

34:30-38:30 | כיול, דיאגנוסטיקה והתנהגות בכשל

יעל: איך מנהלים Calibration בלי טקס קבוע ביומן?

אמיר: מתחילים בקריטיות: אילו מכשירים מגנים על אנשים, קובעים איכות, מאזני אנרגיה או רגולציה, ואילו רק לנוחות. Acceptance Limit נגזר מדרישת התהליך. Interval נגזר מהיסטוריית יציבות, סביבה, הנחיות יצרן וסיכון.

יעל: As-found מראה אם המכשיר אולי היה מחוץ לטולרנס לפני הכיוון.

אמיר: בדיוק. שומרים As-found ו-As-left, תקן ייחוס, אי-ודאות, תנאים, טכנאי, נוהל וקונפיגורציה. אם נמצא Out of Tolerance, מעריכים השפעה על הייצור הקודם ולא רק מכוונים וסוגרים.

יעל: Smart Diagnostics יכול לשפר תחזוקה.

אמיר: כן. NAMUR NE 107 מארגן מצב התקן לארבע קטגוריות: Failure, Function Check, Out of Specification ו-Maintenance Required. הערך הוא משמעות עקבית מהחיישן עד למפעיל.

יעל: Out of Specification לא בהכרח צריך לעצור את התהליך.

אמיר: נכון. התגובה תלויה בפונקציה ובסיכון: Trip, בקשת תחזוקה, שינוי Voting או Quality Flag. ה- Cause and Effect צריך להיות מתוכנן.

יעל: מהם הכשלים החבויים הנפוצים?

אמיר: Frozen Value, Bias, תגובה איטית, מגע לסירוגין, טווח שגוי, Scaling הפוך, יחידות שגויות, Tag כפול, נתון רשת ישן, Sensor שהוחלף בלי פרמטרים, Impulse Line סתום, Coating, Encoder Coupling Slip ו-Software Force.

יעל: Frozen Value מסוכן כי הוא נראה רגוע.

אמיר: מזהים לפי שונות צפויה, Timestamp, Device Status, Heartbeat, השוואה לחיישן אחר או Proof Test. אבל צריך להימנע מ-False Alarm בתהליך שבאמת יציב.

יעל: לכן Quality ו-Timestamp צריכים לנסוע עם הערך.

אמיר: בדיוק. מספר בלי מצב וזמן הוא מידע חלקי. לא משטחים Good, Uncertain, Bad או Substituted ל-Float אחד.

38:30-41:30 | גבולות בטיחות ואזור מסוכן

יעל: מתי מדידה רגילה הופכת לחלק מפונקציית בטיחות?

אמיר: כאשר היא משתתפת בפונקציה מוגדרת. בתעשיית התהליך IEC 61511 עוסק במפרט, תכן, התקנה, הפעלה ותחזוקה של SIS. תת-מערכת החיישן כוללת את החיבור לתהליך, האלמנט, המשדר, מתח, חיווט, דיאגנוסטיקה ולעיתים Voting.

יעל: משדר עם תעודת SIL אינו הופך את כל החוג ל-SIL.

אמיר: נכון. צריך נתוני כשל, Systematic Capability, מגבלות יישום, Proof Test, ארכיטקטורה, Common Cause וה-Final Element. גם עצמאות מבקרת התהליך חשובה.

יעל: אזור מסוכן מוסיף שכבה.

אמיר: IEC 60079-0 נותן דרישות כלליות לציוד Ex, ו-IEC 60079-11 עוסק ב-Intrinsic Safety. הבחירה דורשת Area Classification, קבוצת גז או אבק, Temperature Class, EPL, טמפרטורת סביבה ופרמטרי המעגל. לא מתקינים רק לפי מדבקת Ex; בודקים Associated Apparatus, קיבול והשראות כבל, הארקה ותיעוד.

יעל: גם תחזוקה צריכה לשמור על Concept ההגנה.

אמיר: כן. החלפת Connector, Barrier או Cable בלי בדיקה יכולה לפגוע בתכן. צריך לבדוק אימוץ מקומי, Corrigenda ו-Interpretation Sheets עדכניים. זה גבול הפרק, לא קורס תכן Ex.

יעל: אותו עיקרון חל על חיישני Machine Safety.

אמיר: בהחלט. Interlock או Light Curtain דורשים Risk Assessment, ארכיטקטורה ואימות. לא מקדמים Proximity רגיל להגנת אדם רק כי קל לכתוב לוגיקה.

41:30-44:00 | פתרון הדוגמה וצ׳קליסט סיום

יעל: נפתור את הקפיצה בזמן האצת ה-VFD. מה הסדר?

אמיר: אחת: לבדוק אם חמש מעלות בשנייה אפשריות פיזיקלית. שתיים: להשוות למדידה עצמאית. שלוש: לבדוק Raw Input ויציאת המשדר כדי לאתר איפה הקפיצה נכנסת. ארבע: לאמת Sensor Type, Extension Cable, Cold Junction, Range ויחידות. חמש: לבדוק Routing, Shield, Bonding והפרדה. שש: לעבור על Isolation, Filter, Task Period ו-Trend Sampling. שבע: לתקן Root Cause ורק אז לבחור את הפילטר המינימלי שהתהליך דורש.

יעל: ולתעד ב-Loop Information כדי שהמהנדס הבא לא יגלה הכול מחדש.

אמיר: בדיוק. שאלות הבחירה: מהו ה-Measurand ומיקום המדידה? מה הטווח, נקודת העבודה, אי-הוודאות והתגובה? איזה עיקרון מתאים למדיה ולמכניקה? אילו חומרים, חיבורי תהליך ודירוגי סביבה נדרשים? איזה אות, Diagnostics, מתח ו-Update? איך מתקינים, מכיילים, בודקים ומחליפים? ומה קורה כשהערך Bad, Stale או Missing?

יעל: זה הרבה יותר חזק מ-"צריך חיישן לחץ אפס עד עשר בר".

אמיר: זו דרישה הנדסית במקום בקשת קניות.

יעל: המסקנה: החיישן אינו האמת, אלא רכיב במודל של העולם הפיזיקלי.

אמיר: ובקרה אמינה מתחילה בהכרת גבולות המודל. בפרק 4 נעבור מחישה לפעולה: Solenoids, מפעילים פנאומטיים והידראוליים, Control Valves, Heaters וכיצד פקודת תוכנה הופכת לכוח, תנועה וחום.

יעל: עד אז, אל תחליקו אות לפני ששאלתם למה הוא זז.

אמיר: תודה שהאזנתם ל-Control Edge.

8. הערות למפיק ולמגישים

- לשמור על קצב מקצועי ורגוע. לא לדחוס את מקטע המטרולוגיה; זו תשתית לכל שאר הסדרה.
- בכל הצגת "Accuracy" להזכיר שהמשמעות תלויה בהגדרת היצרן ובתנאי הייחוס.
- בדוגמת Aliasing להשתמש באנלוגיה של גלגל שנראה מסתובב לאחור בצילום, אך להבהיר שמדובר באנלוגיה בלבד.
- לא להפוך את רשימת היצרנים לדירוג או המלצה מסחרית.
- להדגיש שהתקנה מכנית, חיבור לתהליך וחיווט הם חלק ממערכת המדידה.
- לא לקרוא ערכי NE 43 מספריים אם אינם מופיעים במפרט הפרויקט; להתמקד בעקרון ובתיאום בין כל רכיבי הלולאה.
- בדיון Safety ו-Ex לעצור בגבולות האחריות ולהפנות לתכן מוסמך ולמהדורה המקומית המחייבת.
- לשמור את פתרון תקלה ה-VFD לסיום כדי לתת לפרק קשת סיפורית.

9. צ׳קליסט תכן לבחירת שרשרת מדידה

1. מהו הגודל הנמדד המדויק, מיקומו, מצב התהליך ומטרת השימוש?
2. מהם טווח העבודה, מצבי החריגה, עומס היתר, נקודת העבודה ויחס הטווח הנדרש?
3. מהן אי-הוודאות, החזרתיות, היציבות והרזולוציה הנדרשות ברמת המערכת?
4. מהם זמן התגובה, רוחב הפס, קצב הדגימה, ההשהיה והתנהגות חותמת הזמן?
5. איזה עיקרון פיזיקלי מתאים למדיה, למכניקה ולמצבי הכשל הסבירים?
6. מהם חיבור התהליך, החומרים הבאים במגע, האטימה, הניקוי, הרעידות והגישה לתחזוקה?
7. אילו דירוגי טמפרטורה, אטימות, תאימות אלקטרומגנטית, אזור מסוכן ובטיחות נדרשים?
8. מהם ממשק האות, ההזנה, הבידוד, החיווט, הסיכוך והדיאגנוסטיקה?

9. כיצד מתבצעים ההמרה ליחידות הנדסיות, זיהוי חריגה, מצב איכות ובדיקת סבירות?
10. כיצד מכיילים או מאמתים, מהם גבולות הקבלה ומה נשמר לפני ואחרי ההתערבות?
11. מה קורה כשהערך שגוי, קפוא, ישן, חסר או מחוץ למפרט?
12. כיצד מחליפים חלף, משחזרים פרמטרים, מנהלים גרסאות ומתעדים שינוי?

10. מילון מונחים

מונח	משמעות בפרק
Measurand	הגודל שאותו מתכוונים למדוד, כולל מיקום ותנאים מוגדרים מספיק.
Transducer	רכיב הממיר השפעה פיזיקלית לצורה אחרת המתאימה לשימוש או מדידה.
Transmitter	מכשיר הממיר קלט נמדד ליציאה סטנדרטית ויכול להוסיף פיצוי, דיאגנוסטיקה ותקשורת.
Accuracy	מושג איכותי הקשור לקרבה לערך האמיתי; במפרט יש לקרוא את הגדרת היצרן.
Precision	קרבת ההסכמה בין קריאות או ערכים חוזרים בתנאים מוגדרים.
Repeatability	Precision בתנאים חוזרים: אותה שיטה, מערכת, מיקום וזמן קצר.
Measurement Uncertainty	פרמטר לא-שלילי המאפיין את פיזור הערכים המיוחסים ל-Measurand.
Hysteresis	תלות הקריאה בכיוון שממנו הקלט הגיע לנקודה.
Drift	שינוי קריאה או מאפיין מטרולוגי לאורך זמן.
Bandwidth	תחום התדרים שבו שרשרת המדידה עומדת בקריטריון תגובה מוגדר.
Aliasing	הופעת תוכן תדר שקרי בגלל דגימה ופילטר מקדים לא מספקים.
Live Zero	אות שאינו אפס המייצג את תחילת הטווח, כגון 4 mA בלולאת 0 - 2 - 4 mA.
Quality Status	מידע המציין Good, Uncertain, Bad, Substituted או מגבלה אחרת.
As-found / As-left	תוצאות כיול לפני התערבות ואחריה.

11. מפת תקנים ומקורות

איך להשתמש ברשימה

תקנים מתעדכנים ומאומצים באופן שונה לפי מדינה, ענף וחוזה. לפני תכן או רכש יש לאמת את המהדורה

המחייבת, Amendments, Corrigenda, Interpretation Sheets ודרישות רגולטוריות מקומיות.

1. IEC 62828-1:2026 - Reference conditions and procedures for testing industrial and process measurement transmitters - general procedures for all transmitter types. Official source
2. IEC 61298-1:2026 - General methods and procedures for evaluating process instrumentation other than PMTs covered by IEC 62828. Official source
3. IEC 61298-2:2026 - Tests under reference conditions for process instrumentation. Official source
4. IEC 61298-3:2026 - Tests for effects of influence quantities on process instrumentation. Official source
5. JCGM 200:2012 (VIM) - International Vocabulary of Metrology - basic and general concepts and associated terms. Official source
6. JCGM 100:2008 and Amendment 1:2026 - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement and the 2026 amendment on nonlinearity in measurement models. Official source
7. IEC 61326-1:2020 - EMC requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use. Official source
8. IEC 60751:2022 - Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. Official source
9. IEC 60584-1:2013 - Thermocouple reference functions and tolerances. Official source
10. IEC 60584-3:2021 - Thermocouple extension and compensating cables - tolerances and identification. Official source
11. IEC 60947-5-2:2019 - Requirements for inductive, capacitive, ultrasonic, photoelectric and magnetic proximity switches. Official source
12. IEC 60947-5-7:2024 - Requirements for proximity devices with analog or corresponding digital-value outputs. Official source
13. IEC 61131-9:2022 - Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators, commonly known as IO-Link. Official source
14. FieldComm Group - HART technology - Official overview of simultaneous 4-20 mA analog and FSK digital HART communication. Official source
15. NAMUR NE 43 - Standardization of signal levels for failure information from digital transmitters with analog output. Official source
16. NAMUR NE 107 - Self-monitoring and diagnostics of field devices: Failure, Function Check, Out of Specification and Maintenance Required. Official source
17. ANSI/ISA-5.1-2024 - Instrumentation and Control - Symbols and Identification. Official source
18. IEC 60079-0:2026 - General requirements for Ex Equipment and Ex Components in or associated with explosive atmospheres. Official source
19. IEC 60079-11:2023 - Equipment protection by intrinsic safety “i”; current corrigenda and interpretation sheets also need review. Official source
20. IEC 61511-1:2016+A1:2017 - Safety instrumented systems lifecycle requirements for the process industry sector. Official source

12. שער איכות לפרק

- המאזין מסוגל לצייר שרשרת מדידה מלאה מהגודל הנמדד ועד לערך, מצב האיכות וחותמת הזמן.
- דיוק, חזרתיות ואי-ודאות אינם מוצגים כמילים נרדפות.
- כיול, כוונון ואימות מופרדים במפורש.
- תגובה דינמית, סינון ודגימה שגויה מחוברים להשפעתם על בקרה ואזעקות.
- טכנולוגיות חישה נבחרות לפי עיקרון פיזיקלי ותנאי תהליך, לא לפי סיסמה.
- לולאת זרם, HART ו-IO-Link מתוארים במדויק ובלי לבטל זה את זה.
- התקנה, חיווט, סיכוך, המרה ושמירת היסטוריה מוצגים כחלק מאותה שרשרת.
- בטיחות ואזור מסוכן מקבלים גבול אחריות ברור בלי להפוך את הפרק לתכן מוסמך.
- הסיום יוצר מעבר ישיר לפרק 4 על מפעילים ורכיבי בקרה סופיים.