

WYZNACZANIE ODCHYLEŃ I SPADKÓW NAPIĘCIA W SIECIACH NISKIEGO NAPIĘCIA ZASILAJĄCYCH NIESYMETRYCZNE I NIELINIOWE ODBIORNIKI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Determination of Voltage Variations and Voltage Drops in Distribution Networks Supplying Asymmetrical and Nonlinear Loads

Zbigniew KOWALSKI
Politechnika Łódzka

Streszczenie: W artykule przedstawiono przede wszystkim metody obliczania odchyłeń i spadków napięcia w sieciach niskiego napięcia zasilających niesymetryczne i nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej. Przedmiotem rozważań są linie niskiego napięcia z przewodem powrotnym (neutralnym), zwłaszcza linie trójfazowe czteroprzewodowe. Linie jednofazowe dwuprzewodowe i linie dwufazowe trójprzewodowe potraktowane zostały jako szczególne przypadki linii trójfazowej czteroprzewodowej.

Zaprezentowane metody obliczania odchyłeń i spadków napięcia odnoszą się w szczególności do linii niesymetrycznych i symetrycznych, obciążonych odbiornikami niesymetrycznymi i symetrycznymi, liniowymi i nieliniowymi.

Prezentowane metody obliczeniowe opierają się na znajomości łatwo wyznaczalnych impedancji własnych i wzajemnych pętli „przewód fazowy — przewód neutralny” dla częstotliwości technicznej (podstawowej) napięć i prądów i dla wyższych częstotliwości, odpowiadających częstotliwościom wyższych harmonicznym napięć i prądów. W odniesieniu do odbiorników nieliniowych zasilanych rozpatrywanymi liniami przedstawione metody obliczeniowe wykorzystują również zasadę superpozycji poszczególnych harmonicznym spadków i poziomów napięcia w liniach.

Summary: This paper presents methods for calculating voltage variations and voltage drops in distribution networks supplying asymmetrical and nonlinear loads. Low-voltage lines with a neutral conductor, especially three-phase, four-conductor lines, are considered. Single phase lines with two conductors and two-phase lines with three conductors are treated here as a special case of the three-phase, four-conductor line.

The presented methods for calculating voltage variations and voltage drops are related to asymmetrical and symmetrical lines loaded with asymmetrical and symmetrical, linear and nonlinear loads. They are based on easy-to-determine values of the self-impedance and mutual impedance of the “phase conductor-neutral conductor” loop for voltage and current nominal (basis) and higher frequencies.

In the case of nonlinear loads supplied by these lines, the methods use voltage-drop and voltage-level superposition for all harmonics in these lines.

1. WPROWADZENIE. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA

Jak wiadomo, odchylenie napięcia na zaciskach odbiorników i urządzeń elektrycznych stanowi jeden z ważnych parametrów jakościowych energii elektrycznej. Z definicji tego parametru, wyrażonej wzorem

$$\Delta V^* = \frac{U - U_N}{U_N} 100 \quad [\%] \quad (1)$$

gdzie U_N — napięcie znamionowe, wynika, że w celu wyznaczenia wartości odchylenia napięcia ΔV^* należy znać przede wszystkim skuteczną wartość napięcia U , ponieważ znamionowa wartość napięcia U_N jest zwykle zadana.

Rozpatrywane będą sieci niskiego napięcia. W sieciach takich wartość napięcia U oblicza się najczęściej ze wzoru

$$U = U_s^X - \delta U \quad (2)$$

w którym

- U_s^X — skuteczna wartość napięcia w punkcie X , z którego zasilany jest rozpatrywany układ elektroenergetyczny, sprowadzona (z wykorzystaniem przekładni transformatora lub transformatorów) do poziomu napięcia tego układu,
 δU — spadek napięcia w tym układzie.

Załóżmy, że wartość U_s^X jest znana. Może to być np. wartość średniego napięcia ($\dot{S}N$) na szynach górnego napięcia w stacji $\dot{S}N/nn$, zasilającej sieci niskiego napięcia (nn), sprowadzona do poziomu napięcia tej sieci.

Zasadniczy problem przy wyznaczaniu odchylenia napięcia ΔV^* sprowadza się zatem głównie do obliczenia spadku napięcia δU .

Warto nadmienić, że w sieciach nn normowane są zwykle nie tylko wartości dopuszczalnych odchyżeń napięcia, lecz często, np. w sieciach oświetleniowych, także wartości dopuszczalnych spadków napięcia.

W jednofazowych liniach (sieciach) nn zasilających liniowe odbiorniki jednofazowe oraz w symetrycznych liniach (sieciach) nn zasilających symetryczne i liniowe odbiorniki trójfazowe sposoby obliczania spadków napięcia δU i poziomów napięcia U są od dawna znane i powszechnie stosowane. Natomiast w sieciach nn zasilających odbiorniki nieliniowe zarówno jedno-, jak i wielofazowe oraz w sieciach o niesymetrycznych liniach wielofazowych (zwykle trójfazowych) zasilających symetryczne i niesymetryczne odbiorniki liniowe i nieliniowe metody obliczania wartości napięcia U i spadków napięcia δU wydają się niejednoznaczne lub niepełne, wymagające przy tym przyjmowania nieraz zbyt ostrych założeń upraszczających.

Zamierzeniem niniejszego artykułu jest przedstawienie propozycji uporządkowanych sposobów wyznaczania odchyżeń i spadków napięcia właśnie w tych wyżej wymienionych sieciach nn , a zwłaszcza w liniach zasilających odbiorniki nieliniowe.

Spadek napięcia δU we wzorze (2) obejmuje często dwa składniki: spadek napięcia w transformatorze (transformatorach) $\dot{S}N/nn$ (δU^T) i spadek napięcia w linii (liniach) nn (δU^L), tj.

$$\delta U = \delta U^T + \delta U^L \quad (3)$$

W niniejszym artykule przedstawione będą metody obliczania składnika δU^L i problemy z tym związane.

Przedmiotem artykułu będą linie (obwody zasilające) nn z tzw. przewodem powrotnym, zasilające odbiorniki jedno-, dwu- i trójfazowe, a więc linie jedno-, dwu- i trójfazowe. W przypadku linii trójfazowych będą to linie czteroprzewodowe (trzy przewody fazowe i przewód neutralny).

Spadki i poziomy napięcia w sieciach nn oblicza się zwykle dla normalnych warunków ich pracy. Przy tych

obliczeniach ewentualne występowanie specjalnego przewodu ochronnego (lub żyły ochronnej w liniach kablowych) nie wpływa na wyniki obliczeń. Z tego powodu rozpatrując układy linii nn i ich obliczeniowe schematy zastępcze nie będziemy uwzględniać ww. przewodu ochronnego, np. piątego przewodu w liniach trójfazowych. Rozpatrywać będziemy tylko sieci i linie prądu przemiennego.

Z punktu widzenia praktycznych obliczeń spadków napięcia w rozpatrywanych liniach nn można rozróżnić następujące charakterystyczne układy takich linii (rys. 1):

- linię jednofazową dwuprzewodową (rys. 1a),
- linię dwufazową trójprzewodową (rys. 1b),
- linię trójfazową czteroprzewodową (rys. 1c).

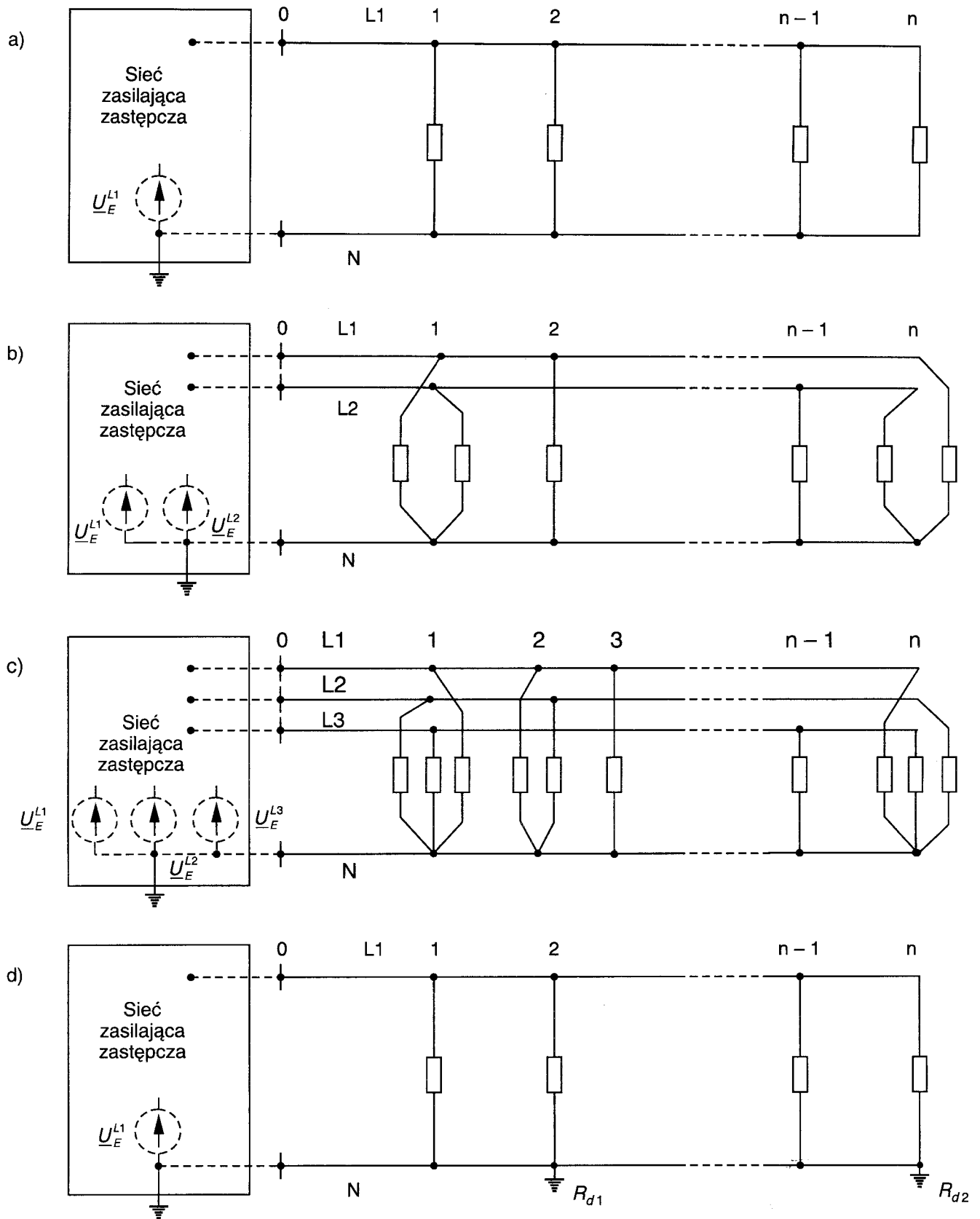
Schematy na rysunku 1 mają charakter ogólny. W szczególnych przypadkach liczba zasilanych odbiorników może być różnaita, np. tylko jeden odbiornik zasilany linią. Oznaczone na rysunku 1b odbiorniki mogą być odbiornikami dwufazowymi (rzadko) lub jednofazowymi, zasilanymi z różnych faz L1 lub L2. Podobnie odbiorniki na rysunku 1c mogą być zarówno odbiornikami trójfazowymi, jak i dwufazowymi lub (często) jednofazowymi, zasilanymi z różnych faz L1, L2 lub L3.

Linia trójfazowa trójprzewodowa jest przypadkiem specjalnym. Z obliczeniowego punktu widzenia może być traktowana jako linia dwufazowa trójprzewodowa. Przypadek takiej linii nie jest przedmiotem niniejszego artykułu.

Przewód neutralny (N) może nie być nigdzie uziemiony oprócz uziemienia w punkcie neutralnym transformatora zasilającego $\dot{S}N/nn$ — jak na rysunku 1a, b i c — lub może być dodatkowo uziemiony w jednym albo w kilku punktach linii — jak przykładowo na rysunku 1d — jednofazowej dwuprzewodowej. W takim przypadku część prądu odbiorników wraca do źródła zasilania nie tylko przez przewód neutralny N, lecz także poprzez dodatkowe uziemienie tego punktu — ziemię lub inny uziemiony element (konstrukcje, rurociągi itp.) Jeżeli opory dodatkowych uziemień R_{d1} i R_{d2} na rysunku 1d są względnie (w odniesieniu do oporów przewodu neutralnego N) duże, można praktycznie pominąć wpływ dodatkowej drogi powrotnej dla prądów odbiorników na spadki napięcia w liniach (obwodach) nn . W przeciwnym wypadku może okazać się celowe uwzględnienie pełnego obwodu powrotnego. W niniejszym artykule założymy, że zachodzi pierwszy z tych przypadków, tj. że prąd (prądy) odbiorników wraca (wracają) tylko przez przewód neutralny N.

Rozważane linie mogą być liniami (obwodami) wewnętrznymi lub zewnętrznymi w budynkach, liniami wewnętrznymi w zakładach produkcyjnych, liniami napowietrznymi, liniami kablowymi itp. Linie wewnętrzne w budynkach mogą składać się z oddzielnych przewodów w rurkach izolacyjnych, bądź z izolowanych, umieszczonych we wspólnej powłoce izolacyjnej, przewodów wielożyłowych (wielodrutowych) itp.

W liniach dwufazowych, a nieraz także w liniach trójfazowych, zachodzi potrzeba obliczania spadków napięcia w każdej fazie, zwłaszcza z powodu niesymetrycznego ich obciążenia. Asymetria obciążeń występuje w rolniczych i komunalnych sieciach nn , w oświetleniowych sieciach w zakładach przemysłowych itd.



Rys.1. Uproszczone schematy sieci niskiego napięcia zasilające różnego rodzaju odbiorniki energii elektrycznej: a) sieć jednofazowa dwuprzewodowa z odbiornikami jednofazowymi, b) sieć dwufazowa trójprzewodowa z odbiornikami jednofazowymi i dwufazowymi, c) sieć trójfazowa czteroprzewodowa z odbiornikami jednofazowymi, dwufazowymi i trójfazowymi, d) sieć jednofazowa z dodatkowymi uziemieniami przewodu neutralnego; L1, L2 i L3 — przewody fazowe, N — przewód neutralny.

Jeżeli rozpatrywana linia (obwód) zasilająca odbiorniki w kilku lub w wielu jej punktach, to spadek napięcia w takiej linii (w fazie linii) równa się sumie spadków napięcia występujących między kolejnymi punktami, tj.

$$\delta U = \sum_{i=1}^n \delta U_{i-1,i} \quad (4)$$

gdzie

$\delta U_{i-1,i}$ — spadek napięcia między punktami $i-1$ oraz i w linii.

Na ogół oblicza się największy spadek napięcia w linii.

Z merytorycznego i praktycznego punktu widzenia istotna jest znajomość sposobów obliczania spadków napięcia w liniach nn między dwoma sąsiednimi punktami linii, w których przyłączone są odbiorniki lub inne linie, np. linie odgałęźne, obwody oświetleniowe itp.

Przyjmujemy, że punktami tymi są oznaczone na rysunku 1 punkty 1 i 2. Zostaną umownie opuszczone indeksy 1 i 2 przy oznaczeniach prądów, strat i spadków napięcia, oporów i niektórych innych wielkości, odnoszących się do rozpatrywanego odcinka linii.

Przy wyznaczaniu spadków napięcia w rozpatrywanych liniach nn przyjęto naturalny fazowy układ odniesienia (nie układ składowych symetrycznych). Impedancje własne i wzajemne pętli przewodowych w tym układzie wyznaczono korzystając ze znanych w literaturze własnych i wzajem-

nych impedancji pętli ziemnopowrotnych. Ponieważ przy poczynionym założeniu ziemia nie bierze udziału w przewodzeniu prądu w rozważanych liniach, impedancje pętli przewodowych nie zawierają oczywiście parametrów obwodu ziemnopowrotnego. W artykule nie podano szczegółowych wyprowadzeń wzorów na impedancje pętli przewodowych, starając się zamieścić jedynie wzory końcowe.

Rozpatrywano następujące ogólne przypadki linii nn:

- 1) linię 3-fazową 4-przewodową obciążoną niesymetrycznie odbiornikami liniowymi,
- 2) linię 3-fazową 4-przewodową obciążoną niesymetrycznie odbiornikami nieliniowymi.

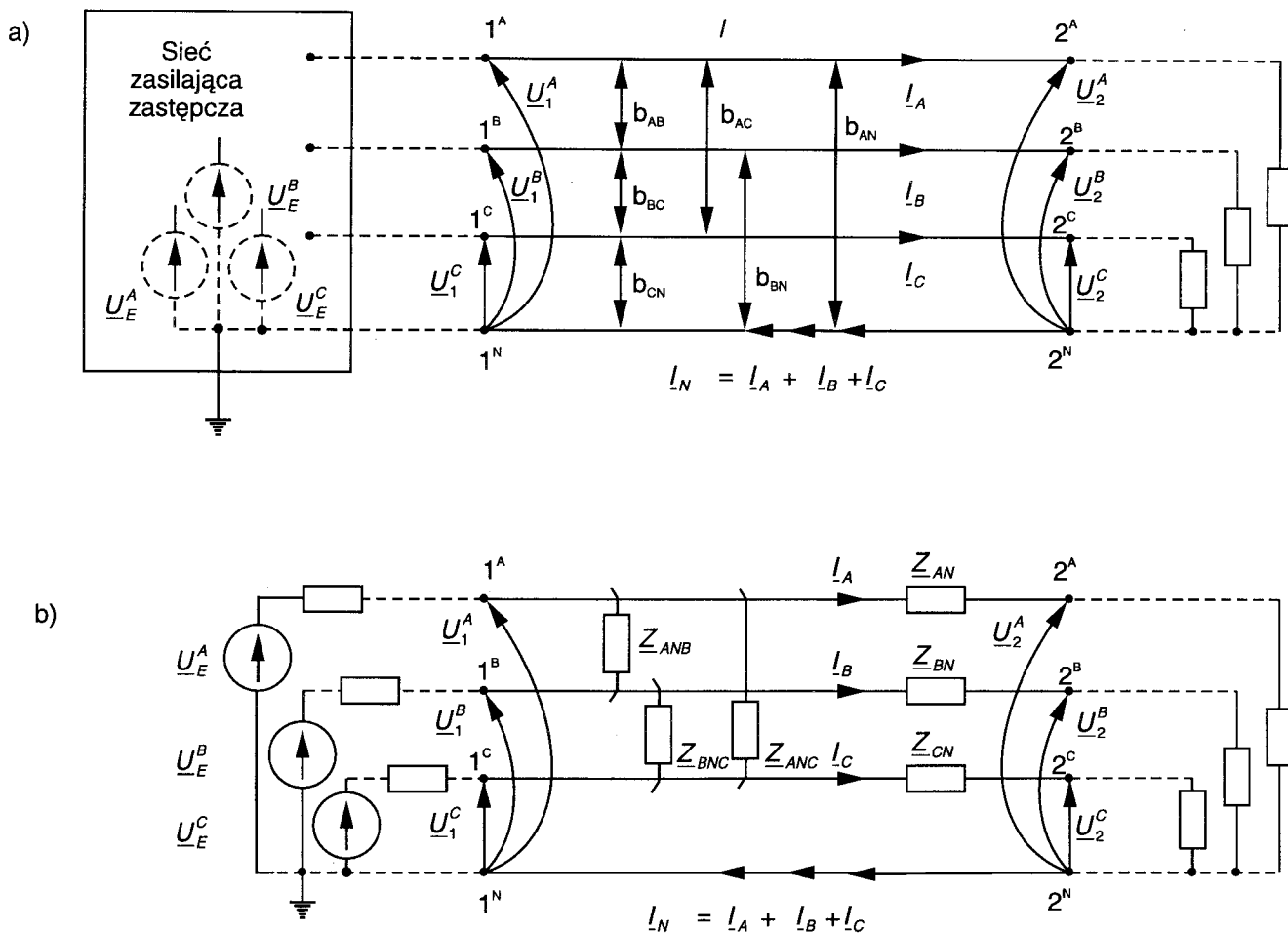
Inne linie będą szczególnymi przypadkami linii wyżej wymienionych.

Założono, że rozpatrywane linie są ogólnie liniami niesymetrycznymi.

2. LINIA 3-FAZOWA 4-PRZEWODOWA OBCIĄŻONA NIESYMETRYCZNIE ODBIORNIKAMI LINIOWYMI

Przyjęto, że napięcia i prądy w wymienionej wyżej linii są sinusoidalne o częstotliwości technicznej (50 Hz).

Straty napięcia w poszczególnych fazach (pętlach A-N, B-N i C-N) odcinka 1-2 linii — zgodnie z rysunkiem 2a — wyrażają się wzorami:



Rys.2. Uproszczonego schematu odcinka linii trójfazowej czteroprzewodowej (a) i oporowy schemat zastępczy tego odcinka (b).

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_A &= \underline{U}_1^A - \underline{U}_2^A = \underline{Z}_{AN} \underline{I}_A + \underline{Z}_{ANB} \underline{I}_B + \underline{Z}_{ANC} \underline{I}_C \\ \Delta \underline{U}_B &= \underline{U}_1^B - \underline{U}_2^B = \underline{Z}_{BN} \underline{I}_B + \underline{Z}_{BNA} \underline{I}_A + \underline{Z}_{BNC} \underline{I}_C \\ \Delta \underline{U}_C &= \underline{U}_1^C - \underline{U}_2^C = \underline{Z}_{CN} \underline{I}_C + \underline{Z}_{CNA} \underline{I}_A + \underline{Z}_{CNB} \underline{I}_B\end{aligned}\quad (5)$$

Na podstawie zasady wzajemności impedancji

$$\underline{Z}_{BNA} = \underline{Z}_{ANB} \quad \underline{Z}_{BNC} = \underline{Z}_{CNB} \quad (6)$$

We wzorach (5), (6) i (7)

\underline{Z}_{AN} , \underline{Z}_{BN} i \underline{Z}_{CN} — impedancje własne pętli przewodów odpowiednio A–N, B–N i C–N, (na odcinku 1–2 oznaczenie odcinka poniżej pominiemy).

\underline{Z}_{ANB} , \underline{Z}_{ANC} i \underline{Z}_{BNC} (oraz \underline{Z}_{BNA} , \underline{Z}_{CNA} i \underline{Z}_{CNB}) — impedancje wzajemne pętli przewodów odpowiednio A–N i B–N, A–N i C–N oraz B–N i C–N.

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{AN} &= R_{AN} + jX_{AN} \\ \underline{Z}_{BN} &= R_{BN} + jX_{BN} \\ \underline{Z}_{CN} &= R_{CN} + jX_{CN} \\ \underline{Z}_{ANB} &= R_{ANB} + jX_{ANB} \\ \underline{Z}_{ANC} &= R_{ANC} + jX_{ANC} \\ \underline{Z}_{BNC} &= R_{BNC} + jX_{BNC}\end{aligned}\quad (7)$$

gdzie:

R_{AN} , R_{BN} i R_{CN} — rezystancje i reaktancje własne pętli przewodów odpowiednio A–N, B–N i C–N.

R_{ANB} , R_{ANC} i R_{BNC} (oraz X_{ANB} , X_{ANC} i X_{BNC}) — rezystancje i reaktancje wzajemne pętli przewodów odpowiednio A–N i B–N, A–N i C–N oraz B–N i C–N.

Można uzasadnić, że wymienione wyżej rezystancje i reaktancje (w omach) wyrażają się następującymi wzorami obliczeniowymi:

$$\begin{aligned}R_{AN} &= R_A + R_N \\ R_{BN} &= R_B + R_N \\ R_{CN} &= R_C + R_N \\ R_{ANB} &= R_{BNA} = R_N \\ R_{ANC} &= R_{CNA} = R_N \\ R_{BNC} &= R_{CNB} = R_N\end{aligned}\quad (8)$$

dla częstotliwości prądu $f = 50$ Hz

$$\begin{aligned}X_{AN} &\approx \left(0,1451 \text{g} \frac{b_{AN}^2}{r_{Ae} r_{Ne}} \right) 10^{-3} l \\ X_{BN} &\approx \left(0,1451 \text{g} \frac{b_{BN}^2}{r_{Be} r_{Ne}} \right) 10^{-3} l \\ X_{CN} &\approx \left(0,1451 \text{g} \frac{b_{CN}^2}{r_{Ce} r_{Ne}} \right) 10^{-3} l \\ X_{ANB} &\approx \left(0,1451 \text{g} \frac{b_{AN} b_{BN}}{b_{AB} r_{Ne}} \right) 10^{-3} l \\ X_{ANC} &\approx \left(0,1451 \text{g} \frac{b_{AN} b_{CN}}{b_{AC} r_{Ne}} \right) 10^{-3} l \\ X_{BNC} &\approx \left(0,1451 \text{g} \frac{b_{BN} b_{CN}}{b_{BC} r_{Ne}} \right) 10^{-3} l\end{aligned}\quad (9)$$

gdzie:

R_A, R_B, R_C — rezystancje przewodów odpowiednio A, B i C,
 R_N — rezystancja przewodu neutralnego N,
 l — długość rozpatrywanego odcinka 1–2 w metrach,
 b_{AN}, b_{BN}, b_{CN} — odległości między przewodami odpowiednio A i N, B i N oraz C i N,
 b_{AB}, b_{AC}, b_{BC} — odległości między przewodami odpowiednio A i B, A i C oraz B i C (rys. 2a),
 $r_{Ae}, r_{Be}, r_{Ce}, r_{Ne}$ — promienie zastępcze przewodów odpowiednio A, B, C i N.

Odległości między przewodami i zastępcze promienie przewodów we wzorach (9) wyrażone są w tych samych jednostkach.

Zastępczy promień przewodu uwzględnia wewnętrzną reaktancję przewodu; $r_e = kr$, gdzie r — promień przewodu (żyły przewodzącej kabla), k — współczynnik, którego wartości podane są w literaturze; praktycznie w liniach nn można przyjąć w przybliżeniu $k = 0,8$.

W typowych liniach wnetrzowych i w liniach kablowych nn odległości między przewodami są niewielkie. Względnie niewielką wartość mają więc ww. reaktancje. Sprawia to, że są często pomijane w obliczeniach spadków napięcia w tego rodzaju liniach. W liniach wewnętrznych szynoprzewodowych oraz w liniach napowietrznych ww. reaktancje często nie mogą być pominięte w tych obliczeniach.

W liniach nn zwykle $r_{Ae} = r_{Be} = r_{Ce}$, a nieraz również $r_{Ne} = r_{Ae}$. Często także $b_{AN} = b_{BN} = b_{CN} = b_{AB} = b_{AC} = b_{BC}$ lub równości te zachodzą w przybliżeniu. Prowadzi to do ułatwień obliczeniowych reaktancji podanych we wzorach (9).

Równaniom (5) odpowiada obliczeniowy schemat zastępczy badanego odcinka linii, podany na rysunku 2b.

Spadki napięcia w poszczególnych fazach A, B i C (w pętlach A–N, B–N i C–N) równają się:

$$\begin{aligned}\delta U_A &= U_1^A - U_2^A \approx \Delta U'_A \\ \delta U_B &= U_1^B - U_2^B \approx \Delta U'_B \\ \delta U_C &= U_1^C - U_2^C \approx \Delta U'_C\end{aligned}\quad (10)$$

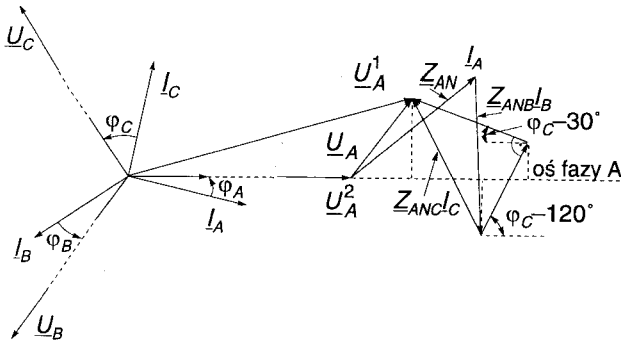
gdzie

$\Delta U'_A, \Delta U'_B$ i $\Delta U'_C$ — podłużne straty napięcia (rzuty odpowiednich strat napięcia $\Delta \underline{U}_A, \Delta \underline{U}_B$ i $\Delta \underline{U}_C$ na osie pokrywające się z wektorami odpowiednich napięć fazowych $\underline{U}_A, \underline{U}_B$ i \underline{U}_C).

W celu otrzymania wzorów do obliczania ww. podłużnych strat napięcia można posłużyć się wykresem wektorowym.

Podamy przykładowo sposób obliczania podłużnej straty napięcia $\Delta U'_A$, a więc i spadku napięcia δU_A w fazie A (pętli A–N), posługując się wykresem wektorowym przedstawionym na rysunku 3.

Wykres ten został wykonany przy założeniu, że przesunięcia fazowe między sąsiednimi wektorami poszczególnych napięć fazowych równają się 120° .



Rys.3. Wykres wektorowy napięć, prądów i strat napięcia w fazie A w odcinku linii trójfazowej czteroprzewodowej.

Na rysunku 3 wyeksponowano straty $Z_{ANC}I_C = R_{ANC}I_C + jX_{ANC}I_C$ oraz rzuty tych składników na oś fazy A.

Na podstawie wykresu z rysunku 3 otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \delta U_A \approx \Delta U_A &= R_{AN}I_A \cos \varphi_A + X_{AN}I_A \sin \varphi_A \\ &- R_{ANB}I_B \cos(60^\circ - \varphi_B) + X_{ANB}I_B \cos(30^\circ + \varphi_B) \\ &+ R_{ANC}I_C \cos(120^\circ - \varphi_C) - X_{ANC}I_C \cos(\varphi_C - 30^\circ) \\ &= R_{AN}I_A \cos \varphi_A + X_{AN}I_A \sin \varphi_A \\ &- \frac{1}{2}R_{ANB}(I_B \cos \varphi_B + \sqrt{3}I_B \sin \varphi_B) \\ &+ \frac{1}{2}X_{ANB}(\sqrt{3}I_B \cos \varphi_B - I_B \sin \varphi_B) \\ &- \frac{1}{2}R_{ANC}I_C \cos \varphi_C + \frac{\sqrt{3}}{2}R_{ANC}I_C \sin \varphi_C \\ &- \frac{\sqrt{3}}{2}X_{ANC}I_C \cos \varphi_C - \frac{1}{2}X_{ANC}I_C \sin \varphi_C \end{aligned} \quad (11)$$

Uwzględniając uprzednio podane wzory odnoszące się do rezystancji własnych i wzajemnych oraz oznaczając przez I'_A , I'_B i I'_C prądy czynne, a przez I''_A , I''_B i I''_C prądy bierne, otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \delta U_A \approx (R_A + R_N)I'_A + X_{AN}I''_A - \frac{1}{2}R_N(I'_B + \sqrt{3}I''_B) \\ + \frac{1}{2}X_{ANB}(\sqrt{3}I'_B - I''_B) - \frac{1}{2}R_N(I'_C - \sqrt{3}I''_C) \\ - \frac{1}{2}X_{ANC}(\sqrt{3}I'_C + I''_C) \end{aligned} \quad (12)$$

W przypadku, gdy $I''_A = I''_B = I''_C = 0$,

$$\begin{aligned} \delta U_A \approx (R_A + R_N)I'_A + \frac{1}{2}(\sqrt{3}X_{ANB} - R_N)I'_B \\ - \frac{1}{2}(R_N - \sqrt{3}X_{ANC})I'_C \end{aligned} \quad (13)$$

Jeżeli takie same są czynne prądy fazowe, tj. $I'_A = I'_B = I'_C$ oraz fazowe prądy bierne równają się sobie, tj. $I''_A = I''_B = I''_C$ (symetria obciążenia), to

$$\begin{aligned} \delta U_A \approx \left[R_A + \frac{\sqrt{3}}{2}(X_{ANB} - X_{ANC}) \right] I'_A \\ + \left[X_{AN} - \frac{1}{2}(X_{ANB} + X_{ANC}) \right] I''_A \end{aligned} \quad (14)$$

Ponieważ $X_{ANB} = X_{ANC}$, gdy $b_{AB} = b_{AC} = b$, więc

$$\delta U_A \approx R_A I'_A + X_A I''_A \quad (15)$$

gdzie

$$X_A = X_{AN} - X_{ANB} \quad (16)$$

Przy założeniu, że również $b_{AN} = b_{BN} = b$

$$X_A \approx j \left(0,1451 g \frac{b}{r_{Ac}} \right) 10^{-3} l \quad (17)$$

W omawianym przypadku przez przewód neutralny N nie płynie prąd, więc we wzorach (14) i (15) nie występuje rezystancja tego przewodu R_N .

Gdyby pominąć reaktancje własne i wzajemne obwodu z powodu ich względnie małej wartości w szeregu przypadkach linii, wzór (12) przyjmie postać:

$$\delta U_A \approx R_A I'_A + R_N \left[I'_A - \frac{1}{2}(I'_B + I'_C + \sqrt{3}I''_B - \sqrt{3}I''_C) \right] \quad (18)$$

Jeżeli dodatkowo założyć symetrię obciążenia, to

$$\delta U_A \approx R_A I'_A \quad (19)$$

Wzór (19) jest często stosowany w praktyce do obliczania spadków napięcia w liniach nn niezależnie od tego, czy są spełnione warunki symetrii obciążenia.

Aby obliczyć spadki napięcia w fazach B i C, tj. δU_B i δU_C , można zastosować wyżej opisaną metodę opartą na sporządzonym wykresie wektorowym. Należałoby wykonać takie wykresy odnoszące się oddzielnie do fazy B i fazy C.

Można również zastosować następujący sposób postępowania, korzystając z wyżej podanych wzorów i wykresu wektorowego, odnoszących się do fazy A. W tym celu wystarczy zmienić odpowiednio oznaczenia faz. Jeżeli np. zachodzi potrzeba obliczenia spadku napięcia w fazie B, oznaczonej na rysunku 2, należy ją oznaczyć symbolem A, fazę C — symbolem B, a fazę A — symbolem C. Można wtedy korzystać z wyżej podanych wzorów służących do obliczania spadku napięcia w fazie A, zmieniając w nich wszystkie symbole (prądów, rezystancji, reaktancji, promieni przewodów i odległości między przewodami) z A na B, z B na C i z C na A.

Zamiast korzystać z wykresów wektorowych przy obliczaniu spadków napięcia można oczywiście stosować również metodę analityczną, wyodrębniając z równań (5) podłużne (w osiach odpowiednich napięć) składniki strat napięcia, równe w przybliżeniu spadkom napięcia.

Na przykład spadek napięcia w pętli A-N

$$\begin{aligned} \delta U_A \approx \Delta U_A &= R_{AN}I_A \cos \varphi_{A,A} + R_{BNA}I_B \cos \varphi_{B,A} \\ &+ R_{CNA} \cos \varphi_{C,A} + X_{AN}I_A \sin \varphi_{A,A} \\ &+ X_{BNA}I_B \sin \varphi_{B,A} + X_{CNA}I_C \sin \varphi_{C,A} \end{aligned} \quad (20)$$

gdzie

$$\varphi_{A,A} = \varphi_A = \angle(\underline{I}_A, \underline{U}_A), \varphi_{B,A} = \angle(\underline{I}_B, \underline{U}_A), \varphi_{C,A} = \angle(\underline{I}_C, \underline{U}_A)$$

Podane wyżej zależności umożliwiające obliczanie spadków napięcia w liniach 3-fazowych 4-przewodowych mogą być również stosowane do obliczania spadków napięcia w liniach 2-fazowych 3-przewodowych i 1-fazowych 2-przewodowych. Wystarczy tylko nie uwzględniać odpowiednich prądów występujących w przewodach linii 3-fazowej 4-przewodowej. Na przykład w celu obliczenia spadków napięcia w linii 2-fazowej 3-przewodowej należy przyjąć $I'_C = 0$ i $I''_C = 0$.

Tak więc w linii 2-fazowej 3-przewodowej (przewody fazowe A i B oraz przewód neutralny N) strata i spadek napięcia np. w fazie A (w pętli A-N) równają się

$$\Delta U_A = Z_{AN} I'_A + Z_{ANB} I'_B \quad (21)$$

$$\delta U_A \approx (R_A + R_N) I'_A + X_{AN} I''_A - \frac{1}{2} R_N (I'_B + \sqrt{3} I''_B) + \frac{1}{2} X_{ANB} (\sqrt{3} I'_B - I''_B) \quad (22)$$

a w przypadku szczególnym, gdy $I'_A = 0$ i $I''_B = 0$,

$$\delta U_A \approx (R_A + R_N) I'_A + \frac{1}{2} (\sqrt{3} X_{ANB} - R_N) I'_B \quad (23)$$

Wzór (22) na spadek napięcia δU_A został ustalony przy założeniu, że napięcia fazowe \underline{U}^A i \underline{U}^B (na końcu odcinka) przesunięte są w fazie o 120° , przy czym napięcie w fazie B jest opóźnione względem napięcia w fazie A.

W linii 1-fazowej 2-przewodowej (przewód fazowy A i przewód neutralny N) w pętli A-N

$$\Delta U_A = Z_{AN} I'_A \quad (24)$$

$$\delta U_A \approx (R_A + R_N) I'_A + X_{AN} I''_A \quad (25)$$

W szczególnym przypadku braku prądu biernego i takich samych przewodów A i N ($R_A = R_N = R$)

$$\delta U_A \approx 2R I'_A \quad (26)$$

Schematy obliczeniowe linii 2-fazowej 3-przewodowej i linii 1-fazowej 2-przewodowej mają podobną postać jak na rysunku 2 po wyeliminowaniu odpowiedniej liczby gałęzi na rysunku 2a i sprzężeń impedancyjnych na rysunku 2b.

3. LINIA 3-FAZOWA 4-PRZEWODOWA OBCIĄŻONA NIESYMETRYCZNIE ODBIORNIKAMI NIELINIOWYMI

Z praktycznego punktu widzenia obliczanie spadków napięcia w liniach, w których czasowe przebiegi prądów są niesinusoidalne, jest trudnym zadaniem. Trudność ta wynika przede wszystkim z tego, że oddziaływanie prądów odkształconych w linii nie jest takie same jak sumaryczne oddziaływanie poszczególnych składowych harmonicznych prądów o przebiegu sinusoidalnym, na które można rozłożyć niesinusoidalne przebiegi prądów rzeczywistych.

W praktyce stosowana jest przybliżona metoda obliczania spadków napięcia w liniach o prądach odkształconych, której podstawą jest (budzące nieraz wątpliwości) założenie,

że fazowe straty lub spadki napięcia są wynikiem sumarycznych odpowiednio strat lub spadków napięcia, wywołanych przez poszczególne harmoniczne prądów w linii.

Mimo nie w pełni przekonujących argumentów na taki sposób postępowania, metoda ta ma praktyczne potwierdzenie jako przybliżona, dająca zadowalające wyniki. Nazywa się ją nieraz metodą superpozycji.

Fazowy (w pętli A-N) spadek napięcia w rozpatrywanym odcinku linii 1-2, gdy występują odkształcone prądy i napięcia w linii, jest zdefiniowany tak samo jak w przypadku, gdy prądy i napięcia mają przebiegi sinusoidalne, tj.:

$$\delta U_A = U_1^A - U_2^A \quad (27)$$

gdzie U_1^A i U_2^A są skutecznymi wartościami napięć fazowych w punktach 1 i 2 linii;

$$U_1^A = \sqrt{\sum_{h=1}^H (U_{1,h}^A)^2} \quad (28a)$$

$$U_2^A = \sqrt{\sum_{h=1}^H (U_{2,h}^A)^2} \quad (28b)$$

gdzie:

$U_{1,h}^A, U_{2,h}^A$ — skuteczne wartości poszczególnych harmonicznych napięcia w punktach odpowiednio 1 i 2;

$h = 1, 2, \dots, H$ — oznaczenie (rzęd) poszczególnych harmonicznych napięcia.

Wzory (28) przedstawia się również w postaci

$$U_1^A = \sqrt{(U_{1,1}^A)^2 + \sum_{h=2}^H (U_{1,h}^A)^2} \quad (29a)$$

$$U_2^A = \sqrt{(U_{2,1}^A)^2 + \sum_{h=2}^H (U_{2,h}^A)^2} \quad (29b)$$

Napięcia w poszczególnych punktach (i) linii $U_{i,h}^A$, gdy $h > 1$, $i = 0, 1, \dots, n$ nazywane są umownie wyższymi harmonicznymi napięciami, a $U_{i,1}^A$ — podstawową (pierwszą) harmoniczną napięcia.

Pierwsza harmoniczna napięcia ($U_{i,1}^A$) jest harmoniczną o częstotliwości 50 Hz, druga ($U_{i,2}^A$) — o częstotliwości 100 Hz, trzecia ($U_{i,3}^A$) — o częstotliwości 150 Hz itp.

Między napięciami $U_{1,1}^A$ i $U_{2,1}^A$ zachodzi relacja

$$U_{2,1}^A = U_{1,1}^A - \delta U_{A1} \quad (30)$$

gdzie:

δU_{A1} — spadek pierwszej harmonicznej napięcia w rozpatrywanym odcinku linii.

Spadek napięcia δU_{A1} oblicza się wg zasad podanych wyżej w rozdziale 2 przyjmując formalnie $\delta U_{A1} \equiv \delta U_A$.

Powstaje problem obliczania (wyznaczania) wyższych harmonicznych napięcia $U_{1,h}^A$ i $U_{2,h}^A$, gdy $h > 1$ we wzorach (29).

Wartości $U_{1,h}^A$ i $U_{2,h}^A$ ogólnie różnią się. Właśnie te różnice nazywa się umownie spadkami wyższych harmonicznych napięcia, które oznaczać będziemy przez δU_{Ah} :

$$\delta U_{Ah} = U_{1,h}^A - U_{2,h}^A \quad (31)$$

Założmy, że zadane są (obliczone lub pomierzone za pomocą tzw. analizatorów harmonicznyc) wartości $U_{1,h}^A$. W celu obliczenia wartości $U_{2,h}^A$ (na końcu rozpatrywanego odcinka linii należy obliczyć spadek napięcia δU_{Ah} .

Nieraz sieci i instalacje nn (np. oświetleniowe) zasilane są z rozdzielnic, w których nie ma odkształconego napięcia, tj. $U_h = 0$, gdy $h > 1$. W takich przypadkach wyższa harmoniczna napięcia na końcu pierwszego odcinka linii, zgodnie ze wzorem (31) wynosi:

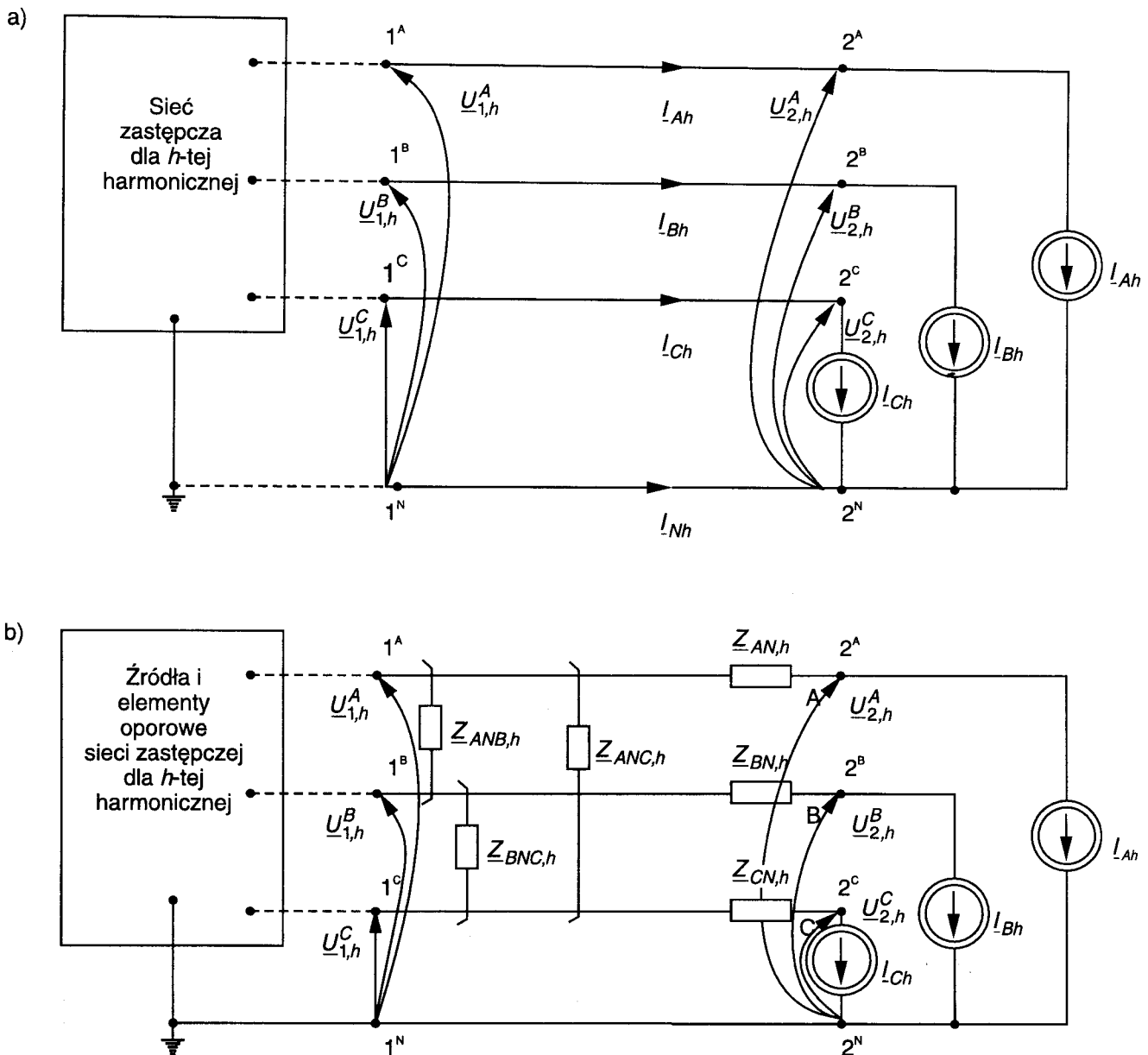
$$U_{2,h}^A = -\delta U_{Ah} \quad (32)$$

W celu obliczenia spadku napięcia δU_{Ah} danej harmonicznej h , gdy $h > 1$, należy znać wartości składowej czynnej (I'_h) i biernej (I''_h) wyższej harmonicznej prądów I_h na rozpa-

trywanym odcinku linii oraz oporowy obliczeniowy schemat zastępczy tego odcinka dla h -tej harmonicznej. Na rysunku 4a podany jest schemat h -tej harmonicznej w przypadku rozpatrywanego odcinka linii 3-fazowej 4-przewodowej.

Występujące na rysunku 4 źródła wyższej harmonicznej (wh) prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} obejmują sumę h -tej wyższej harmonicznej prądów odpowiednio w fazach A, B i C, które pobierane są przez odbiorniki znajdujące się po prawej stronie punktu 2 w linii, w których prądach występuje h -ta harmoniczna prądu. W punkcie 1 linii może również wystąpić źródło wh prądów; źródło to nie ma wpływu na obliczanie spadku napięcia δU_{Ah} w rozpatrywanym odcinku 1-2 linii, zostało więc pominięte.

Schemat na rysunku 4a służy tylko do obliczania spadków wyższych harmonicznych napięcia δU_h . W schemacie tym występują tzw. źródła wyższych harmonicznych prąd-



Rys. 4. Uproszczony schemat zastępczy odcinka linii trójfazowej czteroprzewodowej ze źródłami wyższych harmonicznych prądów dla h -tej harmonicznej (a) oraz oporowy schemat zastępczy tego odcinka (b).

dów I_h jako źródła wywołujące straty i spadki napięcia wyższych harmonicznych odpowiednio ΔU_h i δU_h .

Schemat ten odnosi się tylko do jednej wyższej harmonicznej h . Ogólnie schematów tych jest tyle ile uwzględnia się w obliczeniach wyższych harmonicznych.

Można sobie wyobrazić również obliczeniowe schematy zastępcze także o źródłach wyższych harmonicznych napięć (U_{Eh}). Wtedy $U_{1,h}^A \neq 0$. Schematy takie musiałyby jednak zawierać zastępcze schematy oporowe odbiorników dla wyższych harmonicznych, co w sposób zasadniczy komplikowałoby obliczenia spadków napięcia δU_h .

Poniżej podany jest sposób obliczania spadków napięcia δU_h na rozpatrywanym odcinku linii trójfazowej cztero-przewodowej (rys. 4a).

Dla tego odcinka linii fazowe straty napięcia ΔU_{Ah} , ΔU_{Bh} i ΔU_{Ch} można wyznaczyć korzystając ze wzorów (5), napisanych dla podstawowej harmonicznej strat napięcia.

Mamy więc:

$$\begin{aligned}\Delta U_{Ah} &= U_{1,h}^A - U_{2,h}^A = Z_{AN,h} I_{Ah} + Z_{ANB,h} I_{Bh} + Z_{ANC,h} I_{Ch} \\ \Delta U_{Bh} &= U_{1,h}^B - U_{2,h}^B = Z_{BNA,h} I_{Ah} + Z_{BN,h} I_{Bh} + Z_{BNC,h} I_{Ch} \\ \Delta U_{Ch} &= U_{1,h}^C - U_{2,h}^C = Z_{CNA,h} I_{Ah} + Z_{CNB,h} I_{Bh} + Z_{CN,h} I_{Ch}\end{aligned}\quad (33)$$

Równaniom (33) odpowiada oporowy schemat zastępczy odcinka linii dla h -tej harmonicznej, podany na rysunku 4b.

Symbole impedancji Z z indeksem h są impedancjami dla danej wyższej harmonicznej h .

Impedancje te zdefiniowane są analogicznie jak dla podstawowej harmonicznej, np.:

$$\begin{aligned}Z_{AN,h} &= R_{AN,h} + jX_{AN,h} \\ Z_{ANB,h} &= R_{ANB,h} + X_{ANB,h}\end{aligned}\quad (34)$$

gdzie:

- $R_{AN,h}, X_{AN,h}$ — rezystancja i reaktancja własna pętli przewodów A–N,
- $R_{ANB,h}, X_{ANB,h}$ — rezystancja i reaktancja wzajemna pętli przewodów A–N i B–N

dla wyższej harmonicznej h .

Jeżeli przez R_{AN}, R_{ANB} itd. oznaczyć odpowiednie rezystancje, a przez X_{AN}, X_{ANB} itd. — odpowiednie reaktancje dla harmonicznej podstawowej, to — jak wiadomo z literatury

$$\begin{aligned}R_{AN,h} &= k_h R_{AN} \\ R_{ANB,h} &= k_h R_{ANB}\end{aligned}\quad (35)\quad \text{itd.}$$

gdzie:

$k_h = f(h)$ — współczynnik.

Często przyjmuje się w praktycznych obliczeniach następujące zależności obliczeniowe:

$$\begin{aligned}R_{AN,h} &\approx \sqrt{h} R_{AN} \\ R_{ANB,h} &\approx \sqrt{h} R_{ANB}\end{aligned}\quad (35a)\quad \text{itd.}$$

$$X_{AN,h} = h X_{AN} \quad (36)$$

$$R_{ANB,h} = h X_{ANB} \quad \text{itd.}$$

Warto zasugerować wykonanie prac w celu wyznaczenia dokładniejszej wartości k_h dla rozmaitych rodzajów przewodów i kabli nn.

Mimo że równania (33) strat napięcia wyższych harmonicznych napięcia są podobne do równań (5) określających straty napięcia dla pierwszej harmonicznej napięć, to obliczanie spadków napięcia w $\delta U_{Ah}, \delta U_{Bh}$ i δU_{Ch} w rozpatrywanym odcinku linii stwarza wiele problemów i praktycznych trudności, zasygnalizowanych poniżej.

W przypadku sieci o sinusoidalnych przebiegach napięć i prądów — jak w rozdziale 2 — prądy fazowe pobierane przez odbiorniki są wymuszane przez źródła napięciowe, a w szczególności przez napięcia na tych odbiornikach. Istnieje możliwość wyznaczenia faz tych prądów względem napięć je wymuszających (kąty φ_A, φ_B i φ_C).

Natomiast w rozpatrywanym przypadku, gdy prądy odbiorników są niesinusoidalne, a ich odkształcenia od sinusoidy są wynikiem nieliniowości samych odbiorników, to — stosując przyjętą metodę superpozycji oddziaływania poszczególnych wyższych harmonicznych prądów — wyższe harmoniczne prądów są generowane przez odbiorniki nieliniowe nawet przy założeniu, że napięcia na ich zaciskach są sinusoidalne. Wyższe harmoniczne prądów wymuszają odpowiadające sobie wyższe harmoniczne straty napięcia na rozpatrywanym odcinku linii (i oczywiście na całej linii). Wyłania się problem określenia kątów fazowych $\varphi_{Ah}, \varphi_{Bh}$ i φ_{Ch} oraz odpowiadających im czynnych (I_{Ah}, I_{Bh} i I_{Ch}) oraz biernych (I_{Ah}, I_{Bh} i I_{Ch}) prądów fazowych. Kąty te są miarą przesunięć fazowych między odpowiednimi w napięć i

w prądów fazowych; $\varphi_{Ah} = \angle(U_{Ah}^A, I_{Ah})$, $\varphi_{Bh} = \angle(U_{Bh}^B, I_{Bh})$ i

$\varphi_{Ch} = \angle(U_{Ch}^C, I_{Ch})$. Wyższe harmoniczne napięć U_{Ah}^A, U_{Bh}^B i U_{Ch}^C nieznane są — ani na początku, ani na końcu odcinka linii przed obliczeniem w strat napięcia — tak co do modelu, jak i fazy tych napięć. Niemożliwe jest więc ustalenie kątów $\varphi_{Ah}, \varphi_{Bh}$ i φ_{Ch} wg zasad dotyczących przypadku z sinusoidalnymi przebiegami napięć i prądów.

Warto również zauważyć dodatkowo, że dotychczasowe praktyczne metody umożliwiają obliczenie lub pomiar na ogół tylko modułów w prądów, tj. prądów I_{Ah}, I_{Bh} i I_{Ch} .

Strata napięcia ΔU_{Ah} jest wymuszona przez prąd I_{Ah} w pętli przewodów A–N oraz przez prądy I_{Bh} i I_{Ch} w pętlach odpowiednio B–N i C–N.

W układzie jednofazowym przewodów A–N, zasilanym napięciem sinusoidalnym — wobec relacji (59), z której

wynika, że $|\varphi_{Ah}| = \left| \angle(\Delta U_{Ah}^A, I_{Ah}) \right|$ — kąt φ_{Ah} może być ok-

reślony przez kąt φ_{Ah} impedancji własnej $Z_{AN,h}$; analogicznie w układach przewodów B–N i C–N — przez kąty φ_{Bh} impedancji własnej $Z_{BN,h}$ i φ_{Ch} — przez kąt φ_{Ch} impedancji własnej $Z_{CN,h}$, tj.

$$\begin{aligned}\varphi_{Ah} &= \arctg \frac{X_{AN,h}}{R_{AN,h}} \\ \varphi_{Bh} &= \arctg \frac{X_{BN,h}}{R_{BN,h}} \\ \varphi_{Ch} &= \arctg \frac{X_{CN,h}}{R_{CN,h}}\end{aligned}\quad (37)$$

W układzie 3-fazowym 4-przewodowym niskiego napięcia wymuszony przez prąd I_{Ah} składnik $|Z_{AN,h}I_{Ah}|$ straty napięcia $|\Delta U_{Ah}|$ stanowi główną jej część; składniki $|Z_{ANB,h}I_{Bh}|$ i $|Z_{ANC,h}I_{Ch}|$, wymuszone przez prądy odpowiednio I_{Bh} i I_{Ch} , są zazwyczaj względnie małe, bowiem przede wszystkim $Z_{AN} \gg Z_{ANB} \approx Z_{ANC}$. Można więc zasugerować (póki zagadnienie nie zostanie w pełni rozwiązane) wyznaczanie kątów φ_{Ah} , φ_{Bh} i φ_{Ch} w praktyce obliczeniowej ze wzorów (37) w układach 3-fazowych 4-przewodowych, a także 2-fazowych 3-przewodowych niskiego napięcia.

Praktycznie

$$\begin{aligned} R_{AN,h} &= R_{BN,h} = R_{CN,h} \approx \sqrt{h}(R+R_N) \\ X_{AN,h} &= X_{BN,h} = X_{CN,h} = hX \end{aligned} \quad (38)$$

gdzie:

- R — jw. rezystancja przewodu fazowego,
a R_N — rezystancja przewodu neutralnego (odcinka 1–2), dla pierwszej harmonicznej,
 X — reaktancja własna pętli „przewód fazowy–przewód neutralny N' ” dla podstawowej harmonicznej;

$$X \approx \left(0,1451 \lg \frac{b^2}{r_e^2}\right) 10^{-3} l = 2 \left(0,1451 \lg \frac{b}{r_e}\right) 10^{-3} l \quad (39)$$

- b — jw. odległość między przewodem fazowym i przewodem neutralnym.

Założono przy tym, że promienie przewodów fazowych i neutralnego są takie same. Jeżeli przewody fazowe i neutralny są różne, a dodatkowo, jeżeli odległości między przewodami fazowymi i neutralnym są też różne, można oczywiście korzystać z dokładniejszych wzorów, np. odpowiednich wzorów (9) i podobnych.

Przy powyższych ustaleniach spadek napięcia δU_{Ah} stanowi podłużną stratę napięcia ΔU_{Ah} , jako rzut wektora ΔU_{Ah} na oś napięcia $\underline{U}_{2,h}^A$, przyjętą za oś odniesienia, tj. $\underline{U}_{2,h}^A = U_{2,h}^A$.

Wyłania się kolejny problem wyznaczania przesunięć fazowych między fazowymi w prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} , tj. kątów

$$\varphi_{AB}^I = \angle(I_{Bh}, I_{Ah}), \varphi_{AC}^I = \angle(I_{Ch}, I_{Ah}) \text{ i } \varphi_{BC}^I = \angle(I_{Ch}, I_{Bh}).$$

Założmy, że fazowe napięcia w sieci trójfazowej czteroprzewodowej, a ściślej pierwsze harmoniczne tych napięć, tworzą układy kolejności zgodnej, tj. przesunięcia fazowe między wektorami tych napięć równają się: $\varphi_{AB}^U = \angle(\underline{U}_A, \underline{U}_B) = 120^\circ$,

$$\varphi_{BC}^U = \angle(\underline{U}_B, \underline{U}_C) = 120^\circ \text{ i } \varphi_{AC}^U = \angle(\underline{U}_A, \underline{U}_C) = 240^\circ.$$

Przy tym założeniu, które jest praktycznie spełnione lub w przybliżeniu spełnione w rozpatrywanych sieciach zachodzą (teoretycznie uzasadnione) następujące zjawiska:

1. Wyższe harmoniczne prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} rzędów 3, 9, 15 itd. (tj. gdy liczba $h/3$ jest liczbą całkowitą) tworzą trójfazowe układy kolejności zerowej. Wtedy

$$\varphi_{AB}^I = \varphi_{BC}^I = \varphi_{AC}^I = 0$$

W tym przypadku prądy (w prądów) I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} są w fazie.

2. Wyższe harmoniczne prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} rzędów 4, 7, 10, 13 itd. (tj. gdy $h = 3x + 1$, gdzie $x = 1, 2, 3, \dots$) tworzą trójfazowe układy kolejności zgodnej. Wtedy

$$\varphi_{AB}^I = 120^\circ, \varphi_{BC}^I = 120^\circ, \varphi_{AC}^I = 240^\circ$$

3. Wyższe harmoniczne prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} rzędów 2, 5, 8, 11 itd. (tj. gdy $h = 3x - 1$, gdzie $x = 1, 2, 3, \dots$) tworzą trójfazowe układy kolejności przeciwnej. Wtedy

$$\varphi_{AB}^I = 240^\circ, \varphi_{BC}^I = 240^\circ, \varphi_{AC}^I = 120^\circ$$

(Kąty powyższe mierzone są między odpowiednimi wektorami prądów w kierunku ruchu wskazówek zegara).

Ad.1.

Jeżeli układ w prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} jest układem kolejności zerowej, to spadek napięcia δU_{Ah} w fazie A, równy podłużnej stracie napięcia ΔU_{Ah} w tej fazie, na podstawie wzoru (33) równa się:

$$\begin{aligned} \delta U_{Ah} = \Delta U_{Ah} &= (R_{AN,h} I_{Ah} + R_{ANB,h} I_{Bh} + R_{ANC,h} I_{Ch}) \\ &+ (X_{AN,h} I_{Ah} + X_{ANB,h} I_{Bh} + X_{ANC,h} I_{Ch}) \end{aligned} \quad (40)$$

Ponieważ

$$\begin{aligned} R_{AN,h} &\approx \sqrt{h}(R_A + R_N) \\ R_{ANC,h} &\approx R_{ANB,h} = \sqrt{h} R_N \end{aligned} \quad (41)$$

$$X_{ANC,h} = X_{ANB,h} = hX_m \text{ lub } X_{ANC,h} \approx X_{ANB,h} \quad (42)$$

więc

$$\begin{aligned} \delta U_{Ah} &= \sqrt{h} \left[R_A I_{Ah} + R_N (I_{Ah} + I_{Bh} + I_{Ch}) \right] \\ &+ h \left[X_{AN} I_{Ah} + X_m (I_{Bh} + I_{Ch}) \right] \end{aligned} \quad (43)$$

przy czym $X_m = X_{ANB} = X_{ANC}$.

Jeżeli prądy kolejności zerowej I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} tworzą symetryczny układ tej kolejności, tj. gdy

$$I_{Ah} = I_{Bh} = I_{Ch} = I_h \quad (44)$$

wtedy

$$\delta U_{Ah} \approx R_{A,h} I_h + X_{A,h} I_h \quad (45)$$

gdzie

$$R_{A,h} \approx \sqrt{h}(R_A + 3R_N) \quad (46)$$

$$X_{A,h} = h(X_{AN} + 2X_m) \approx j \left(3h \cdot 0,1451 g \frac{b}{r_{Ne}} \sqrt[3]{\frac{b}{r_{Ae}}} \right) 10^{-3} l \quad (47)$$

przy czym b — odległość między przewodami;
założono $b_{AN} = b_{BN} = b_{CN} = b_{AB} = b_{BC} = b$.

Ad.2.

Jeżeli układ prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} jest układem kolejności zgodnej, to spadek napięcia w fazie A — korzystając ze wzoru (13) — będzie wynosił:

$$\begin{aligned} \delta U_{Ah} \approx \Delta U'_{Ah} &= (R_{A,h} + R_{N,h}) I'_{A,h} + X_{AN,h} I''_{A,h} \\ &- \frac{1}{2} R_{N,h} (I'_{B,h} + \sqrt{3} I''_{B,h}) + \frac{1}{2} X_{ANB,h} (\sqrt{3} I'_{B,h} - I''_{B,h}) \\ &- \frac{1}{2} R_{N,h} (I'_{C,h} - \sqrt{3} I''_{C,h}) - \frac{1}{2} X_{ANC,h} (\sqrt{3} I'_{C,h} + I''_{C,h}) \end{aligned} \quad (48)$$

W szczególnym przypadku, gdy układ prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} jest trójfazowym symetrycznym układem kolejności zgodnej, tj. gdy

$$I_{Bh} = \alpha^2 I_{Ah}, \quad I_{Ch} = \alpha I_{Ah} \quad (49)$$

a w szczególności, gdy

$$\begin{aligned} I'_{Bh} &= I'_{Ch} = I'_{Ah} = I'_h \\ I''_{Bh} &= I''_{Ch} = I''_{Ah} = I''_h \end{aligned} \quad (50)$$

to

$$\delta U_{Ah} \approx R_{Ah} I'_h + X_{A,h} I''_h \quad (51)$$

gdzie

$$R_{A,h} \approx \sqrt{h} R_A \quad (52)$$

$$X_{A,h} = h(X_{AN} - X_{ANB}) \quad (53)$$

przy założeniu, że $X_{ANB} = X_{ANC}$, tj. gdy $b_{AB} = b_{AC} = b$.

Podobnie postępując można wyznaczyć spadek napięcia δU_{Ah} w trzecim ww. przypadku, gdy układ prądów I_{Ah} , I_{Bh} i I_{Ch} jest trójfazowym symetrycznym układem kolejności przeciwniej.

Podane wyżej zasady obliczeń spadków napięcia δU_{Ah} na rozpatrywanym odcinku linii 3-fazowej 4-przewodowej mogą być wykorzystane również do obliczeń takich spadków w liniach 2-fazowych 3-przewodowych i w liniach 1-fazowych 2-przewodowych — podobnie jak przy obliczaniu spadków napięcia δU_A dla podstawowej harmonicznej napięć i prądów.

Należy oczywiście znać relacje między wyższymi harmonicznymi I_{Ah} i I_{Bh} w przypadku linii 2-fazowej 3-przewodowej dla rozmaitych rzędów wh prądów. Na przykład dla harmonicznych rzędów 3, 9, 15, ... prądy I_{Ah} i I_{Bh} są w fazie, a w szczególnym przypadku są takie same.

W całej linii, analogicznie jak określono to wzorem (4),

$$\delta U_{Ah} = \sum_{i=1}^n \delta U_{A,i-1,i,h} \quad (54)$$

Jeżeli założyć, co często jest spełnione, że napięcia zasilające rozpatrywaną linię są sinusoidalne, to oczywiście na początku linii $U_{0,h}^A = 0$, $U_{0,h}^B = 0$ i $U_{0,h}^C = 0$, gdy $h > 1$.

Wtedy największy spadek napięcia np. w fazie A (od punktu zasilania linii (0) do ostatniego punktu odbioru (n), w którym występuje prąd odkształcony)

$$\delta U_{0-n,h}^A = \delta U_{h,max}^A = U_{0,h}^A - U_{n,h}^A = -U_{n,h}^A \quad (55)$$

Wzór (55) służy w praktyce do obliczania największej wartości skutecznej wh napięcia $U_{n,h}^A$ w ww. końcowym punkcie linii, w którym przyłączony jest odbiornik nieliniowy (np. lampa wyładowcza).

W dowolnym i -tym punkcie linii

$$U_{i,h}^A = |-\delta U_{A,0-i,h}| \quad (56)$$

Skuteczna wartość napięcia w fazie A w punkcie n linii

$$U_n^A = \sqrt{(U_{n,1}^A)^2 + \sum_{h=2}^H (U_{n,h}^A)^2} \quad (57)$$

gdzie

$$U_{n,1}^A = U_0^A - \delta U_1^A \quad (58)$$

przy założeniu zaś, że $U_{0,h}^A = 0$, gdy $h > 1$

$$U_{n,h}^A = |-\delta U_h^A| \quad (59)$$

przy czym przez δU_1^A oznaczono spadek napięcia w fazie A na całej rozpatrywanej linii podstawowej harmonicznej napięcia;

$\delta U_1^A \equiv \delta U_{0-n,1}^A = \delta U_{1,max}^A$; δU_h^A — spadek h -tej wyższej harmonicznej napięcia w fazie A linii; $\delta U_h^A \equiv \delta U_{0-n,h}^A = \delta U_{h,max}^A$.

Całkowity spadek napięcia w fazie A linii, równy spadkowi maksymalnemu w tej fazie, wynosi więc:

$$\begin{aligned} \delta U^A &= U_0^A - U_n^A = U_0^A - \sqrt{(U_0^A - \delta U_1^A)^2 + \sum_{h=2}^H |-\delta U_h^A|^2} = \\ &= U_0^A - \sqrt{(U_0^A)^2 - 2U_0^A \delta U_1^A + \sum_{h=1}^H (\delta U_h^A)^2} \end{aligned} \quad (60)$$

Licząc się ze względnie istotnym błędem, w obliczeniach szacunkowych spadek napięcia δU^A można wyznaczyć ze wzoru

$$\delta U^A \approx \sqrt{\sum_{h=1}^H (\delta U_h^A)^2} \quad (61)$$

Jeżeli napięcie w punkcie zasilania linii w fazie A jest odkształcone i zawiera wh napięcia $U_{0,h}^A$, wtedy oczywiście

$$\begin{aligned} U_0^A &\approx \sqrt{\sum_{h=1}^H (U_{0,h}^A)^2} \\ U_n^A &\approx \sqrt{\sum_{h=1}^H (U_{n,h}^A)^2} \end{aligned} \quad (62)$$

W celu obliczenia największego spadku napięcia w linii $\delta U^A = U_0^A - U_n^A$ należy znać podstawową ($U_{0,1}^A$) i wyższe harmoniczne ($U_{0,h}^A, h > 1$) napięcia na początku linii oraz spadki napięcia δU_1^A i δU_h^A , gdy $h > 1$ w linii.

Warto wspomnieć o złożoności obliczeń spadków napięcia w przypadku zasilania odbiorników nieliniowych napięciem odkształconym. W takim przypadku obliczeniowe schematy zastępcze oprócz prądowych źródeł wh muszą zawierać również napięciowe źródła wh napięcia. Oprócz wh prądów, występujących przy zasilaniu odbiorników napięciem sinusoidalnym (podstawowej harmonicznej), odbiorniki pobierają również dodatkowe prądy odkształcone wymuszane przez odkształcone napięcia. Problem nie jest jeszcze rozwiązany w aspekcie praktycznym, jest tu więc pominięty.

4. ZAKOŃCZENIE

Podane w artykule metody umożliwiają obliczanie spadków, poziomów i odchyłeń napięcia w liniach (sieciach) niskiego napięcia z przewodem powrotnym (neutralnym) w dość licznie spotykanych przypadkach, a mianowicie:

- w przypadku linii niesymetrycznych, a w szczególnych przypadkach linii symetrycznych, obciążonych odbiornikami liniowymi niesymetrycznymi, a także — odbiornikami symetrycznymi,
- jw., lecz obciążonych odbiornikami nieliniowymi.

Prezentowane metody obliczeniowe opierają się na znajomości impedancji własnych i wzajemnych pętli „przewód fazowy–przewód neutralny” dla częstotliwości technicznej (podstawowej) napięć i prądów i dla wyższych częstotliwości, odpowiadających częstotliwościom wyższych harmonicznych tych wielkości. W przypadku odbiorników nieliniowych zasilanych rozpatrywanymi liniami przedstawione metody obliczeniowe wykorzystują również zasadę

superpozycji poszczególnych harmonicznym spadków i poziomów napięcia w liniach. Przyjęcie tej zasady ma charakter tymczasowy, jako jedna z możliwych metod praktycznych. Zasada ta wymaga głębszego uzasadnienia i eksperymentalnego potwierdzenia. Taki pogląd wynika z przeświadczenia autora, że skoro zjawiska fizyczne, wywołane okresowymi czasowymi odkształconymi przebiegami napięć i prądów o rzeczywistej częstotliwości technicznej (np. 50 Hz), nie są sumą zjawisk powodowanych przez matematyczne i umowne przebiegi sinusoidalne wszystkich składowych harmonicznych, na które są rozłożone, to również stosowanie rozmaitych metod obliczeniowych, opartych na zasadzie superpozycji odpowiednich wielkości, charakteryzujących poszczególne składowe harmoniczne, nie jest przekonujące. Dotyczy to więc także obliczeń napięć i spadków napięć w liniach o odkształconych przebiegach prądów.

Niezależnie od tych wątpliwości, przy stosowaniu zasady superpozycji harmonicznym do obliczania spadków i poziomów napięcia w liniach pojawiają się problemy z praktycznym wyznaczeniem niektórych wielkości, jak rezystancji dla wyższych harmonicznych prądów oraz kątów fazowych wyższych harmonicznych prądów. Problemy te mogą być przedmiotem oddzielnych prac.



Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowalski ukończył w 1952 r. studia w zakresie elektrotechniki ze specjalnością elektroenergetyka na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej. W uczelni tej pracuje nieprzerwanie od 1950 r. W dawnej Katedrze, a od 1970 r. — w Instytucie Elektroenergetyki, zajmuje stanowiska od zastępcy asystenta do profesora zwyczajnego. Pełnił rozmaite funkcje, w tym w latach 1976–1992 dyrektora tego Instytutu. Prowadził lub prowadzi prace

naukowe z zakresu prognozowania w elektroenergetyce, układów, stanów asymetrycznych i prądów zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych oraz jakości energii elektrycznej i niezawodności jej dostawy. Był głównym organizatorem licznych konferencji naukowo-technicznych krajowych jak i międzynarodowych, w tym z dziedziny prądów zwarciovych i jakości energii elektrycznej. Jest autorem wielu rozpraw, artykułów, książek i skryptów oraz referatów z ww. dziedziny elektroenergetyki.