

Włodzimierz Borysowicz PONOMARIEW

Nowosybirski Instytut Elektrotechniczny

Zbigniew MANTORSKI

Instytut Podstawowych Problemów

Elektrotechniki i Energoelektroniki

Politechniki Śląskiej

ANALIZA STATYSTYCZNA NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO W PUNKCIE PRZYŁĄCZENIA NAPIĘDU TYRYSTOROWEGO

Streszczenie. Przy zastosowaniu rozkładu Johnsona została przeprowadzona analiza statystyczna zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym pewien węzeł, do którego podłączone zostały napędy tyrystorowe prądu stałego. Wykazano przydatność tej metody do badań przebiegów napięcia sieciowego.

Szerokie zastosowanie zautomatyzowanych napędów tyrystorowych w rejonach, w których sieci zasilające mają stosunkowo niewielką moc, sprawiło, że sprawa zapewnienia właściwej jakości energii elektrycznej [1] stała się szczególnie ważna. Z zagadnieniem tym wiążą się ściśle wymagania co do zapewnienia tzw. zgodności elektromagnetycznej wyposażenia elektrycznego i sieci zasilającej w węzle obciążenia [2] oraz konieczność zapewnienia wyspkiej sprawności energetycznej sieci zasilającej napędy tyrystorowe.

Należy więc razem z zastosowaniem napędów tyrystorowych w określonej części systemu zasilania prowadzić ocenę zgodności elektromagnetycznej tego napędu i sieci zasilającej oraz zapewnić środki do jej zabezpieczenia. Trzeba przy tym mieć na względzie stochastyczny charakter zmian parametrów zależnych od technologii i warunków pracy zasilanych układów. W wyniku kompleksowego rozwiązania problemu możliwe jest obniżenie zarówno całkowitych nakładów inwestycyjnych takich specyficznych odbiorników energii elektrycznej, jak i nakładów związanych z ich eksploatacją.

Poniżej został przeanalizowany pewien układ zasilania zakładu energią elektryczną (rys. 1), w którym do węzłów 1 ... 9 mogą być podłączone napędy tyrystorowe o mocach porównywalnych z mocą sieci zasilającej.

Taka sytuacja może mieć miejsce np. przy dysproporcji w rozwoju systemów energetycznych lub przy zasilaniu energią elektryczną obszarów znacznie oddalonych od centrów przemysłowych.

Źródłami energii elektrycznej rozpatrywanego układu są elektrownia cieplna i napęd spalinowo-elektryczny, pracujące w zależności od stanu zapotrzebowania energii bądź osobno (na własne obciążenia), bądź razem (obciąż-

zenie wspólne). Podstacje 35/6 kV są zasilane linią elektroenergetyczną 35 kV, a z nich odchodzą linie 6 kV. Bezpośrednio do zasilanych transformatorów i silników energia jest doprowadzana giętkimi, przenośnymi kablami oponowymi 6 kV.

Węzeł 8, pokazany szczegółowo na rys. 1, przedstawia podłączenie tyrystorowego napędu prądu stałego, którego obciążenie ma charakter przypadkowy i napędu asynchronicznego (na rysunku przedstawionego za pomocą zastępczego silnika asynchronicznego), którego praca ma charakter zdeterminowany. Do kompensacji mocy biernej pobieranej przez napęd asynchroniczny zastosowano baterię kondensatorów.

W niektórych przypadkach napęd tyrystorowy może być zasilany ze wspólnego z napędem asynchronicznym transformatora. Do węzła w ogólnym przypadku może być podłączony nie jeden a kilka zautomatyzowanych napędów tyrystorowych napędzających mechanizmy robocze.

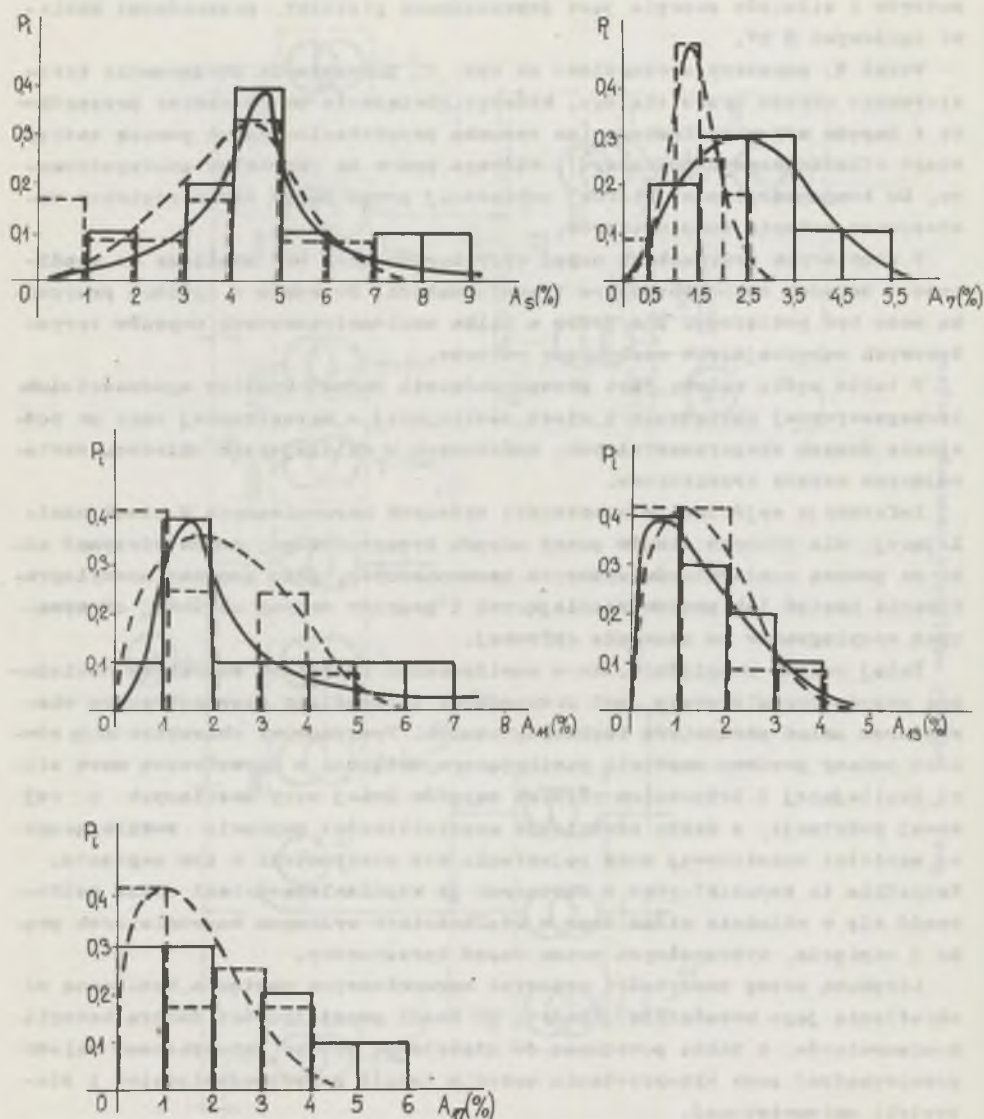
W takim węźle celowe jest przeprowadzenie pełnej analizy zgodności elektromagnetycznej obciążenia i sieci zasilającej o ograniczonej mocy na podstawie danych eksperymentalnych, uzyskanych w działających układach, zawierających napędy tyrystorowe.

Informację wyjściową o zawartości wyższych harmonicznych w sieci zasilającej, dla różnych stanów pracy napędu tyrystorowego, można otrzymać albo za pomocą analizatorów wyższych harmonicznych, albo poprzez oscylografowanie napięć lub prądów zasilających i poprzez dalszą obróbkę otrzymanych oscylogramów na maszynie cyfrowej.

Dalej należy uwzględnić, że w analizowanym przypadku charakter obciążenia napędu tyrystorowego jest przypadkowy i określony stochastycznym charakterem zmian parametrów technologicznych. Przypadkowy charakter mają również zmiany poziomu napięcia zasilającego, związane z ograniczoną mocą sieci zasilającej i istnieniem różnych napędów dużej mocy zasilanych z tej samej podstacji, a także odchylenie częstotliwości napięcia zasilającego od wartości znamionowej oraz pojawienie się niesymetrii w tym napięciu. Wszystkie te czynniki wraz z łączącymi je współzależnościami muszą uwidocznić się w składzie widma oraz w wielkościach wyższych harmonicznych prądu i napięcia, wytwarzanych przez napęd tyrystorowy.

Liczbową ocenę zawartości wyższych harmonicznych napięcia, konieczną do określenia jego wskaźników jakości, do oceny prawidłowości doboru baterii kondensatorów, a także potrzebną do właściwego doboru zabezpieczeń należy przeprowadzać przy wykorzystaniu metod z teorii prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.

Biorąc pod uwagę fakt, że badany napęd tyrystorowy prądu stałego jest zbudowany w oparciu o 3-fazowy mostkowy przekształtnik z komutacją naturalną i zakładając, że generuje on tylko charakterystyczne wyższe harmoniczne, tzn. tylko nieparzyste i o numerze nie będącym krotnością 3, celowe jest w pierwszym rzędzie zbadanie własności tych harmonicznych. W razie konieczności (dla innego typu przekształtnika, przy niestabilności konfi-



Rys. 2. Histogramy oraz przybliżone przebiegi rozkładów amplitud charakterystycznych wyższych harmonicznych napięcia w punkcie P1;

— bateria kondensatorów włączona, - - - bateria kondensatorów wyłączona. $A_n(\%)$ - procentowe wartości amplitud harmonicznych napięcia w odniesieniu do harmonicznej podstawowej

guracji węzła obciążenia) należy analizować również i harmoniczne niecharakterystyczne.

Przy większej liczbie obserwacji wygodną formę zapisu materiału statystycznego są statystyczne szeregi [3]. Dzieląc wszystkie obserwacje amplitud wyższych harmonicznych na jednocentowe przedziały (dla 7 harmonicznej na półcentowe), otrzymuje się liczbę m_1 wielkości, przypadających na każdy i-ty przedział. Po podzieleniu otrzymanych liczb przez całkowitą ilość obserwacji n znajduje się częstości, odpowiadające danemu przedziałowi:

$$p_1 = \frac{m_1}{n} \quad (1)$$

Suma częstości wszystkich przedziałów powinna być równa jedności.

Dokonując w podobny sposób obróbki danych dotyczących amplitud charakterystycznych wyższych harmonicznych napięcia w punkcie P1 (rys.1), przy różnych stanach pracy napędu tyrystorowego, uzyskano histogramy przedstawione na rys. 2.

Wybór rozkładu powinien opierać się przede wszystkim na zrozumieniu mechanizmu badanego zjawiska. Nierzadko rozkłady empiryczne, bez dostatecznych podstaw, zalicza się do normalnych, zapominając przy tym, że obserwowane zjawiska mogą być zgodne z szeregiem różnych modeli, szczególnie gdy obserwacji jest niewiele i poczynione są one w wąskim przedziale wielkości zmiennej niezależnej [4].

Najbardziej rozwiniętymi rodzinami krzywych, pozwalającymi otrzymać ogólny obraz badanego zjawiska przy ograniczonej liczbie eksperymentalnych danych, są rodziny krzywych Pearsona i rozkład Johnsona [5]. Na rys. 3 przedstawiono na płaszczyźnie momentów β_1 i β_2 obszary dla różnych praw rozkładu, gdzie:

- β_1 - kwadrat znormalizowanego współczynnika asymetrii,
- β_2 - znormalizowany współczynnik spłaszczenia.

Wielkości β_1 i β_2 są z reguły nieznane i dlatego dla opisu otrzymanych danych za pomocą któregoś z przedstawionych na rys. 3 praw rozkładu określa się wybiórczo szacunkowe wartości $\hat{\beta}_1$ i $\hat{\beta}_2$ odpowiadające wielkościom β_1 i β_2 , za pomocą następujących wyrażeń [5]:

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_1 &= \frac{m_3}{m_2} \\ \hat{\beta}_2 &= \frac{m_4}{m_3} \end{aligned} \quad (2)$$

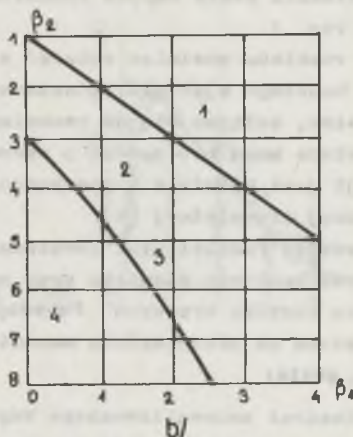
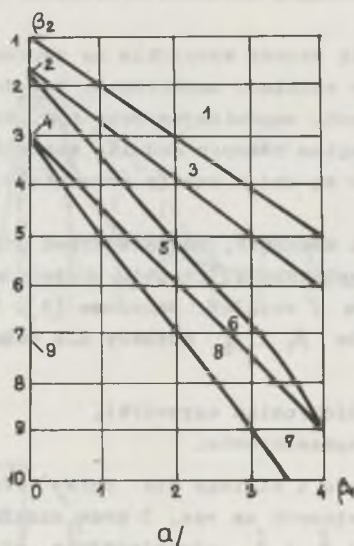
gdzie:

$$m_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2,$$

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^3 - \frac{3}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n x_i + \frac{2}{n^2} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2;$$

$$m_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^4 - \frac{4}{n} \sum_{i=1}^n x_i^3 \sum_{i=1}^n x_i + \frac{6}{n^2} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{3}{n^3} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^4$$

x_i - wielkości przypadkowe, tu względne amplitudy charakterystycznych wyższych harmonicznych napięcia w punkcie P1.



Rys. 3a. Obszary na płaszczyźnie β_1 i β_2 dla różnych praw rozkładu:

1 - obszar krytyczny, 2 - rozkład równomierny (punkt), 3 - obszar U rozkładu beta, 4 - rozkład normalny (punkt), 5 - rozkład beta, 6 - rozkład gamma (krzywa), 7 - rozkład składowy, 8 - rozkład logarytmiczno-normalny (krzywa), 9 - t - rozkład (krzywa)

Rys. 3b. Obszary na płaszczyźnie β_1 i β_2 dla rozkładów Johnsona;

1 - obszar krytyczny, 2 - rozkład S_U , 3 - rozkład S_L (krzywa), 4 - rozkład S_U

Punkt $(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2)$ nanosi się na płaszczyznę na rys. 3. Jeżeli punkt ten będzie leżał dostatecznie blisko punktu, linii lub obszaru odpowiadającego jednemu z modeli, to rozkład ten może być wykorzystany dla opisu danych empirycznych. Następnie określa się szacunkowe wielkości parametrów rozkładu.

Przy przyjęciu takiej metody postępowania należy uwzględnić dwa ograniczenia. Ograniczenie pierwsze: dla dowolnej ilości danych $\hat{\beta}_1$ i $\hat{\beta}_2$ są tylko wartościami szacunkowymi wielkości β_1 i β_2 i dlatego konieczna jest ostrożność, gdy liczba obserwacji jest niewielka. Ograniczenie drugie: kształt rozkładu nie jest określony jednoznacznie przez jego znormalizowane współczynniki asymetrii i spłaszczenia.

Dobór rozkładu Johnsona dla całości eksperymentalnych danych prowadzi się dwuetapowo [5]:

- określa się, które z trzech rodzin rozkładów Johnsona są możliwe do przyjęcia (S_U , S_L , S_B - rozkłady Johnsona, mogące przyjmować bardziej różnorodne formy w porównaniu z innymi znanymi rozkładami, np. gamma czy Cauchy'ego),
- określa się szacunkowe wartości parametrów wybranej rodziny rozkładów Johnsona i znajduje jego empiryczne prawdopodobieństwa.

W celu określenia przynależności całokształtu eksperymentalnych danych do jednego z trzech przybliżających rozkładów wykorzystuje się zależności (2), a także wykresy przedstawiono na rys. 3, gdzie zamiast β_1 i β_2 brane są ich wartości szacunkowe $\hat{\beta}_1$ i $\hat{\beta}_2$. Obliczenia wykazały, że przedstawione na rys. 2 histogramy można aproksymować za pomocą rozkładu S_B - Johnsona.

Rodzinę rozkładów S_B określa funkcja:

$$f_B(x) = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\lambda}{(x - \epsilon)(\lambda - x + \epsilon)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [\eta + \eta \tau(x, \epsilon, \lambda)]^2 \right\} \quad (3)$$

gdzie:

$$\tau(x, \epsilon, \lambda) = \ln \frac{x - \epsilon}{\lambda + \epsilon - x}, \epsilon \leq x \leq \epsilon + \lambda \quad - \text{rodzina funkcji (wg Johnsona),}$$

a parametry kształtu η i η , parametr określający środek rozkładu ϵ i parametr skali λ są:

$$\eta > 0, \quad -\infty < \eta < \infty, \quad \lambda > 0, \quad -\infty < \epsilon < \infty$$

Wielkość przypadkowa podlegająca rozkładowi S_B - Johnsona teoretycznie znajduje się w przedziale ϵ i $\epsilon + \lambda$.

Wielkości szacunkowe η i η ($\hat{\eta}$ i $\hat{\eta}$) znajduje się na drodze przyrównywania dwóch kwantyli, obliczonych na podstawie danych eksperymentalnych, do

odpowiednich kwantyli rozkładu normalnego, co daje odpowiednio wartości $\hat{\eta}$ i $\hat{\eta}'$:

$$\hat{\eta} = \frac{Z_{1-\alpha'} - Z_{\alpha}}{\ln \left[\frac{(x_{1-\alpha'} - \varepsilon)(\varepsilon + \lambda - x_{\alpha})}{(x_{\alpha} - \varepsilon)(\varepsilon + \lambda - x_{1-\alpha'})} \right]} \quad (4)$$

$$\hat{\eta}' = Z_{1-\alpha'} - \eta \ln \left(\frac{x_{1-\alpha'} - \varepsilon}{\varepsilon + \lambda - x_{1-\alpha'}} \right)$$

gdzie Z_{α} i $Z_{1-\alpha'}$ przedstawiają sobą α i $(1 - \alpha')$ kwantyle rozkładu normalnego (z tablicy [5]: $-Z_{0,1} = Z_{0,9} = 1,285$), a x_{α} i $x_{1-\alpha'}$ przedstawiają odpowiednie kwantyle empiryczne.

W celu otrzymania szacunkowych wartości parametrów rozkładu S_B , gdy znana jest tylko dolna granica ε (w analizowanym przypadku nie może być mniejsza od zera), dodatkowo wykorzystuje się jeszcze jedną zależność otrzymaną na drodze porównania empirycznej mediany $x_{0,5}$ do mediany rozkładu normalnego $Z_{0,5} = 0$. Przyjmując symetryczne kwantyle $\alpha = \alpha'$, otrzymuje się:

$$\hat{\lambda} = (x_{0,5} - \varepsilon) \frac{(x_{0,5} - \varepsilon)(x_{\alpha} - \varepsilon) + (x_{0,5} - \varepsilon)(x_{1-\alpha} - \varepsilon) - 2(x_{\alpha} - \varepsilon)(x_{1-\alpha} - \varepsilon)}{(x_{0,5} - \varepsilon)^2 - (x_{\alpha} - \varepsilon)(x_{1-\alpha} - \varepsilon)} \quad (5)$$

Tablica 1

Przybliżone parametry funkcji rozkładu S_B - Johnsona charakterystycznych wyższych harmonicznych napięcia w punkcie P_1

parametr nr w.h.	$x_{0,1}$	$x_{0,5}$	$x_{0,9}$	$\hat{\lambda}$	$\hat{\eta}$	$\hat{\eta}'$
5	2/0,5	4,5/4	8/6	13,7/6,15	1,22/0,42	0,88/-0,26
7	1/0,5	2,5/1,42	4,5/2,25	8,0/2,6	1,17/0,78	0,99/-0,17
11	1/0,2	3/1,33	6/4	9,0/5,5	0,98/0,6	0,6/0,7
13	0,25/0,2	1,33/1,2	3/3	3,75/3,8	0,64/0,61	0,4/0,48
17	0,33/0,2	1,66/1,5	5/3,5	8,4/4,0	0,72/0,53	1,0/0,25

Bateria kondensatorów włączona/wyłączona.
Dla wszystkich przypadków parametr ε równy 0.

W tablicy 1 przedstawiono wyniki obliczeń wartości szacunkowych parametrów funkcji rozkładu S_B - Johnsona dla charakterystycznych wyższych harmonicznych napięcia w punkcie P_1 (rys. 1) dla pracy układu z włączoną i wyłączoną baterią kondensatorów, a na rys. 2 podano obliczone przybliżone przebiegi rozkładów.

Należy zwrócić uwagę, że funkcje rozkładów charakterystycznych wyższych harmonicznych w obu analizowanych przypadkach (włączona i wyłączona bateria kondensatorów) mają podobny charakter. Dla 5 i 7 harmonicznej kształt rozkładu jest zbliżony do normalnego, a dla harmonicznych 11, 13 i 17 posiada znaczną asymetrię.

Przeprowadzona analiza ukazuje celowość zastosowania rozkładów Johnsona do rozwiązania postawionego zadania, charakteryzującego się niewielką liczbą danych wyjściowych. Analiza harmoniczna krzywej napięcia sieciowego, w miejscu przyłączenia napędu tyrystorowego do sieci zasilającej (punkt P1, rys. 1) dała informację wyjściową odpowiadającą realnym warunkom pracy konkretnego układu i umożliwiła określenie parametrów empirycznego rozkładu w grupie rozkładów Johnsona. Przedstawiona metoda określenia funkcji rozkładu charakterystycznych wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym napęd tyrystorowy pozwala na szybkie otrzymanie ich statystycznego obrazu, który może być podstawą przyjęta konkretnych rozwiązań praktycznych.

LITERATURA

- [1] ГОСТ 13109-67. Normy качества электрической энергии у ее приемников присоединенных к электрическим сетям общего назначения
- [2] Konstantinow B.A. i inni: Качество электроэнергии и электромагнитная совместность электрооборудования предприятий. Электричество 1977 nr 3.
- [3] Wentzel E.S.: Теория вероятностей. Наука, Москва 1969.
- [4] Nalimov W.W.: Вступ до розыського видання книжки [5].
- [5] Hahn G.J.: Shapiro S.S.: Statistical Models in Engineering. J. Wiley, New York 1967.

Recenzent: doc. dr inż. Michał Tall

Wpłynęło do redakcji dn. 24.VI.1982 r.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В УЗЛЕ НАГРУЗКИ С ТИРИСТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Резюме

Проведенный статистический анализ гармоник напряжения в узле нагрузки с тиристорным электроприводом показывает применимость распределений Джонсона к этой задаче, характеризующейся незначительным количеством исходных данных.

STATISTICAL ANALYSIS OF SUPPLYING VOLTAGE IN THE NODE WITH THE THYRISTOR DRIVE CONNEXION

Summary

Using Johnson distribution, the author carried out a statistical analysis of the harmonics in the node with the thyristor drive connexion. The usefulness of this method for studying supplying voltage is demonstrated.

	σ_{θ}	σ_{θ}^2	σ_{θ}^3	σ_{θ}^4	σ_{θ}^5	σ_{θ}^6
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
9	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
11	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
12	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
13	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000