

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Πρωτόκολλα ασυρμάτων δικτύων»

ΝΕΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2009

«Πρωτόκολλα ασυρμάτων δικτύων»



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7756/1
Ημερ. Εισ.: 10-12-2009
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
004.62
NEO

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :

1) Λέανδρος Τασιούλας, Καθηγητής, Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Επιβλέπων***,

2) Σπυρίδων – Γεράσιμος Λάλης, Επίκουρος Καθηγητής, Τεχνολογίες Λογισμικού Συστημάτων Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Μέλος***,

3) Ιορδάνης Κουτσόπουλος, Λέκτορας, Ασύρματα Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Μέλος***.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Λ. Τασιούλα που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαιτέρως ενδιαφέρον και διαχρονικό, που άπτεται άμεσα της λειτουργίας ενός δικτύου. Η προσεκτική του καθοδήγηση και η συνεχής επίβλεψη της εργασίας μου οδήγησαν στην ολοκλήρωση των προσπαθειών μου με επιτυχία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Λάρισας κ. Κ. Τσουκάτο για το ειλικρινές ενδιαφέρον και τις εύστοχες παρατηρήσεις του κατά την πορεία της εργασίας καθώς και για την καθοριστική συμβολή του στην ολοκλήρωσή της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η μελέτη του προγραμματισμού των ζεύξεων ενός δικτύου. Η διαδικασία αυτή συνίσταται στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή των ζεύξεων του δικτύου που τίθενται σε λειτουργία κάθε χρονική στιγμή.

Αρχικά παρουσιάστηκε ο Back – Pressure Algorithm, που αποτελεί έναν ευρέως γνωστό αλγόριθμο για τον προγραμματισμό των ζεύξεων ενός δικτύου. Ορίστηκε το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία και περιγράφηκαν τα βήματα του αλγορίθμου. Ο Back – Pressure Algorithm εφαρμόστηκε σε κάποια δίκτυα και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα καθώς και συμπεράσματα από τη χρήση του.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε ένας διαφορετικός τρόπος χρήσης του Back – Pressure Algorithm, ο Alternative Back – Pressure Algorithm. Η ιδέα για αυτόν τον αλγόριθμο βασίστηκε στα προηγούμενα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα προτείνεται η χρήση του Back – Pressure Algorithm ώστε να δημιουργηθεί αρχικά μια βιβλιοθήκη από σύνολα ζεύξεων, που μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα για κάθε δεδομένη τοπολογία, με βάση κάποιες ενδεικτικές τιμές ζήτησης των ζεύξεων του δικτύου. Κατά τη λειτουργία του συστήματος επιλέγεται απλά το κατάλληλο σύνολο ενεργών ζεύξεων που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες του δικτύου.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε διάφορα δίκτυα και συγκρίθηκε με τον Back – Pressure Algorithm. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων έδειξαν ότι πράγματι ο Alternative Back – Pressure Algorithm μπορεί να λειτουργήσει σε πολύ μικρότερο χρόνο σε σχέση με τον Back – Pressure Algorithm, περιορίζοντας όμως την περιοχή λειτουργίας του δικτύου.

ABSTRACT

The purpose of this postgraduate thesis was to study the problem of scheduling the link activation of a queueing network. This process consists on deciding upon the set of the links that are going to be activated at each time.

In the beginning, Back – Pressure Algorithm, which is a widely known algorithm concerning link scheduling problems, was presented. A queueing network model that is suitable for communication networks was considered and the steps of the algorithm were described. Implementations of this algorithm on several networks took place and the results were presented.

A different way to use Back – Pressure Algorithm, the Alternative Back – Pressure Algorithm was then proposed. The idea behind this algorithm is based on the previous conclusions: Back – Pressure Algorithm is used to create a library of link sets, which can be activated simultaneously for a given network topology. During the system operation the link sets that best meet the needs of the network queues are simply chosen.

The proposed algorithm was applied to several networks and was compared to the Back – Pressure Algorithm. Results showed that the Alternative Back – Pressure Algorithm is able to reduce the operational time of the system. On the other hand the stability region of the system is limited.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	8
2. Back – Pressure Algorithm (BPA)	9
2.1 Γενικά.....	9
2.2 Περιγραφή του Συστήματος.....	10
2.3 Αλγόριθμος.....	12
3. Εφαρμογή του BPA και Παρατηρήσεις	14
4. Εναλλακτική Χρήση του BPA	19
4.1 Δημιουργία Βιβλιοθήκης για το Δίκτυο.....	19
4.2 Run – time Environment.....	22
4.3 Περιοχή Λειτουργίας.....	24
4.4 Συνοπτική Παρουσίαση του Alternative BPA.....	25
5. Παραδείγματα και Συγκρίσεις	27
5.1 Δίκτυο “N1”.....	27
5.2 Δίκτυο “N2”.....	30
5.3 Ring Network.....	33
5.4 Δίκτυο “N3”.....	41
6. Συμπεράσματα και Επεκτάσεις	48
7. Βιβλιογραφία	49

1. Εισαγωγή

Η εύρεση ενός νέου αλγορίθμου για τη διαχείριση των ζεύξεων ενός ασυρμάτου δικτύου δεν αποτελεί σκοπό της παρούσας εργασίας. Βασική ιδέα είναι η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων ενός ήδη υπάρχοντος αλγορίθμου, του Back – Pressure Algorithm, με τρόπο ώστε ο προγραμματισμός της λειτουργίας του εκάστοτε δικτύου να γίνεται πιο αποδοτικά ως προς το χρόνο.

Οι επιπτώσεις στην περιοχή λειτουργίας του δικτύου, δηλαδή στο σύνολο των ρυθμών αφίξεων που μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο παραμένοντας σε κατάσταση ισορροπίας, σε σχέση με την απευθείας εφαρμογή του BPA είναι μικρές και υπερκαλύπτονται από τα οφέλη που προέρχονται από τη μείωση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου.

2. Back – Pressure Algorithm (BPA)

2.1. Γενικά

Τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αποτελούνται από κόμβους που έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν σε ουρές αναμονής πληροφορία¹ που προέρχεται είτε από εξωτερικές πηγές που έχουν πρόσβαση σε αυτούς είτε από άλλους κόμβους. Γειτονικοί κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με ζεύξεις που μπορούν να λειτουργήσουν αμφίδρομα με τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης – εξυπηρέτησης. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί στην ταυτόχρονη λειτουργία των ζεύξεων, που οφείλονται στην παρεμβολή μεταξύ τους, και έχουν ως αποτέλεσμα την απαγόρευση της ταυτόχρονης μετάδοσης δύο γειτονικών ζεύξεων.

Η έκφραση “περιοχή λειτουργίας” χαρακτηρίζει εκείνο το σύνολο των ρυθμών αφίξεων για τους οποίους το σύστημα – δίκτυο παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή δεν υπάρχει υπέρμετρη αύξηση του μήκους των ουρών των κόμβων που το αποτελούν. Ο BPA επιτυγχάνει το μέγιστο ρυθμό απόδοσης (μεταφοράς δεδομένων) ενώ το δίκτυο παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας, για δεδομένους ρυθμούς εξυπηρέτησης. Ουσιαστικά οριοθετεί την περιοχή ευστάθειας του συστήματος και υπολογίζει για κάθε χρονική στιγμή εκείνο το σύνολο των ζεύξεων που επιτρέπεται να λειτουργήσουν.

¹ Οι όροι “πληροφορία”, “πακέτα” και “πελάτες” του δικτύου θα εναλλάσσονται στο κείμενο, έχοντας το ίδιο νόημα για το δίκτυο.

2.2. Περιγραφή του Συστήματος

Παραδοχές που σχετίζονται με το μοντέλο του δικτύου στο οποίο έχει εφαρμογή ο BPA περιγράφονται στη συνέχεια. Ο χρόνος θεωρείται χωρισμένος σε ισομήκη διαστήματα (slotted time). Στην αρχή κάθε τέτοιου διαστήματος λαμβάνονται αποφάσεις για το ποιοι πελάτες θα εξυπηρετηθούν και αντίστοιχα ορίζεται το υποσύνολο των ζεύξεων που θα λειτουργήσουν. Συνολικά το σύστημα υπόκειται σε κεντρική διαχείριση που προϋποθέτει πλήρη γνώση του μεγέθους κάθε ουράς αναμονής του δικτύου.

Το δίκτυο περιλαμβάνει L κόμβους που επικοινωνούν μεταξύ τους διαμέσου N ζεύξεων. Για την παράστασή του χρησιμοποιείται γράφος $G = (V, E)$, όπου V είναι το σύνολο των κόμβων και E είναι το σύνολο των ζεύξεων του δικτύου. Όταν μια ζεύξη εξετάζεται προς μια κατεύθυνση, τότε ο κόμβος αρχής συμβολίζεται με $q(i)$, ενώ ο κόμβος προορισμού με $h(i)$.

Τα πακέτα μπορούν να εισέλθουν στο δίκτυο από κάθε κόμβο. Προορισμός για κάθε πακέτο ορίζεται εκείνο το σύνολο των κόμβων, σε όποιον από τους οποίους φτάσει το πακέτο εξέρχεται του δικτύου. Κάθε πακέτο φτάνει στον προορισμό του μετά από κατάλληλη δρομολόγηση. Υπάρχουν J κλάσεις πελατών, καθεμιά από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο σύνολο κόμβων προορισμού. Με V_j συμβολίζεται το σύνολο των κόμβων προορισμού για την κλάση j .

Στις ουρές αναμονής κάθε κόμβου αποθηκεύονται πελάτες όλων των κλάσεων, αρκεί ο συγκεκριμένος κόμβος να μην ανήκει στη λίστα κόμβων προορισμών οποιασδήποτε από αυτές τις κλάσεις. Η δρομολόγηση των πακέτων, δηλαδή η επιλογή της ζεύξης που θα τα μεταδώσει δεν είναι γνωστή κατά την άφιξή

τους σε κάποιον κόμβο, αλλά υπολογίζεται στην αρχή του επόμενου χρονικού διαστήματος.

Κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος κάθε ζεύξη που είναι ενεργή επιτρέπεται να εξυπηρετήσει τους πελάτες μιας μόνο κλάσης. Με τη δυαδική μεταβλητή $E_j(t)$ καθορίζεται αν η ζεύξη i εξυπηρετεί κατά το χρονικό διάστημα t τους πελάτες της κλάσης j . Εφόσον είναι ίση με τη μονάδα, τότε η ζεύξη i είναι ενεργή και εξυπηρετεί πελάτες αυτής της κλάσης, διαφορετικά είτε είναι ανενεργή, είτε εξυπηρετεί πελάτες κάποιας άλλης κλάσης.

Με τη μεταβλητή $X_j(t)$ συμβολίζεται ο αριθμός των πελατών της κλάσης j που βρίσκονται, στο τέλος του χρονικού διαστήματος t , αποθηκευμένοι στην ουρά αναμονής του κόμβου l . Ο ρυθμός εξυπηρέτησης, δηλαδή ο αριθμός των πελατών που μπορεί να εξυπηρετήσει η ζεύξη i κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος συμβολίζεται με m_i .

2.3. Αλγόριθμος

Η επιλογή των ζεύξεων που θα λειτουργήσουν και των κλάσεων που αυτές θα εξυπηρετήσουν γίνεται σε τρία βήματα:

Βήμα 1: Σε κάθε ζεύξη i ανατίθεται ένα βάρος $D_i(t)$, το οποίο προκύπτει με τον τρόπο που περιγράφεται στη συνέχεια. Για κάθε κλάση j και για κάθε ζεύξη i , υπολογίζεται η ποσότητα:

$$D_{ij}(t) = \begin{cases} (X_{q(i)j}(t-1) - X_{h(i)j}(t-1))m_i, & h(i) \notin V_j \\ X_{q(i)j}(t-1)m_i, & h(i) \in V_j \end{cases}$$

Το βάρος κάθε ζεύξης επιλέγεται ως εξής:

$$D_i(t) = \max_{j=1, \dots, J} \{D_{ij}(t)\}$$

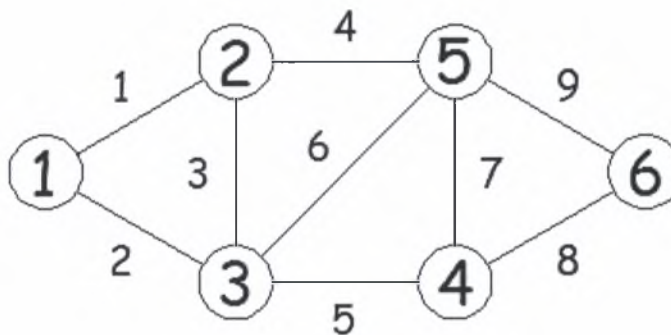
Βήμα 2: Για τον γράφο του συστήματος $G = (V, E)$ και με βάρη τα αντίστοιχα $D_i(t)$ για κάθε ζεύξη, επιλύεται το maximum weighted matching problem. Προκύπτει επομένως ένα υποσύνολο ζεύξεων που επιτρέπεται να λειτουργήσουν ταυτόχρονα και έχουν προτεραιότητα έναντι των υπολοίπων. Αν περισσότερα από ένα υποσύνολα ικανοποιούν την προηγούμενη λύση τότε επιλέγεται τυχαία ένα από αυτά.

Βήμα 3: Οι ζεύξεις που αποτελούν το υποσύνολο που επιλέχθηκε στο Βήμα 2 αρχίζουν τη μετάδοση. Οι κλάσεις που εξυπηρετούν είναι εκείνες για τις ουρές των οποίων επιλέχθηκε το βάρος της εκάστοτε κλάσης $D_i(t)$.

Συμπερασματικά, ο BPA τείνει να εξισορροπεί τα μήκη των ουρών κάθε κλάσης στους διάφορους κόμβους του δικτύου, δίνοντας προτεραιότητα σε εκείνες τις ζεύξεις και τις κλάσεις για τις οποίες η διαφορά είναι μεγαλύτερη. Από την άλλη μεριά, η ανάγκη υπολογισμού στην αρχή κάθε χρονικού διαστήματος του maximum weighted matching επιβαρύνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου.

3. Εφαρμογή του BPA και Παρατηρήσεις

Τα συμπεράσματα τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια προέκυψαν μετά από εφαρμογή του BPA και των υπόλοιπων αλγορίθμων που εξετάζονται σε μια πληθώρα δικτύων, αρκετά διαφορετικών μεταξύ τους. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα ενός συγκεκριμένου δικτύου 6 κόμβων και 9 ζεύξεων, χωρίς όμως αυτό να συμβάλει σε απώλεια της γενικότητας. Το δίκτυο αυτό με όνομα “N1” είναι, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα, ένα σχετικά απλό δίκτυο που όμως λόγω της τοπολογίας του επιτρέπει την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 1: Τοπολογία Δικτύου “N1”

Θεωρείται αρχικά σύστημα έξι κλάσεων, όπου κάθε μία περιλαμβάνει και έναν κόμβο του δικτύου. Δηλαδή η κλάση 1 περιλαμβάνει τον κόμβο 1, η κλάση 2 τον κόμβο 2, κ.ο.κ. Στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος εισέρχονται στο δίκτυο από τους κόμβους πελάτες. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε χρονικό διάστημα, η επιπλέον ζήτηση κάθε ζεύξης είναι ίση με 0.5 πελάτες/slot. Στον κόμβο 1 εισέρχονται στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος 0.5 πελάτες με προορισμό τον κόμβο 2 και 0.5

πελάτες με προορισμό τον κόμβο 3, στον κόμβο 2 εισέρχονται 0.5 πελάτες με προορισμό τον κόμβο 3 και 0.5 πελάτες με προορισμό τον κόμβο 5, κοκ.

Ο μέγιστος ρυθμός εξυπηρέτησης των ζεύξεων λαμβάνεται ίσος με 2 πελάτες/slot¹. Εφόσον λειτουργεί μια ζεύξη, τότε αυτή μεταδίδει με το μέγιστο ρυθμό. Εάν δεν υπάρχει αρκετή πληροφορία να μεταδώσει τότε η ζεύξη θα λειτουργήσει με τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό ώστε να εξυπηρετήσει τους πελάτες της κλάσης που έχει επιλεγεί.

Τα αποτελέσματα που δίνει ο BPA για τα χρησιμοποιούμενα σύνολα ζεύξεων που τίθενται σε λειτουργία σε κάθε χρονικό διάστημα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Κάθε στήλη αντιστοιχεί σε 1 χρονικό διάστημα. Με μονάδα απεικονίζονται οι ζεύξεις (αντιστοιχούν στις γραμμές του πίνακα) που πρόκειται να λειτουργήσουν στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
5	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
7	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
8	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
9	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Πίνακας 1: Εφαρμογή του BPA στο “N1” για σταθερό ρυθμό εισόδων

Το σύνολο των ζεύξεων που εξυπηρετούν κατά το 1^ο χρονικό διάστημα ταυτίζεται με τα σύνολα του 5^ο, του 9^ο, του 13^ο, κοκ. Η ίδια περιοδικότητα

¹ Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο ρυθμός εξυπηρέτησης που χρησιμοποιείται είναι ίσος με τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό εξυπηρέτησης των ζεύξεων, όπως αυτός υπολογίζεται ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στο “Link Scheduling in Polynomial Time”.

παρατηρείται και για τα σύνολα των ζεύξεων που μεταδίδουν κατά το 2^ο, το 3^ο και το 4^ο χρονικό διάστημα.

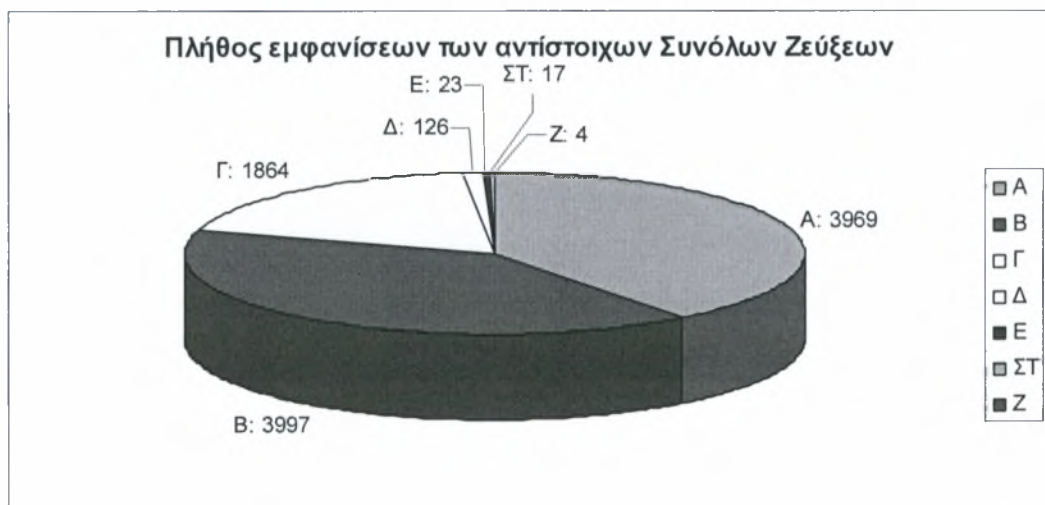
Επομένως, για σταθερό ρυθμό εισόδων σε κάθε ζεύξη, παρουσιάζεται μια περιοδικότητα στα χρησιμοποιούμενα σύνολα ζεύξεων που καλούνται να εξυπηρετήσουν τους πελάτες. Αυτή η ακολουθία των συνόλων ζεύξεων που επαναλαμβάνονται κατά τη λειτουργία του συστήματος θα ονομάζεται “schedule”.

Στη συνέχεια θεωρείται πάλι το σύστημα του δικτύου “N1” των 6 κλάσεων, όπως προηγουμένως. Σε κάθε κόμβο εισέρχεται πληροφορία προς όλες τις υπόλοιπες κλάσεις, στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος. Θεωρείται ότι ο ρυθμός με τον οποίο εισέρχονται πελάτες στο σύστημα από έναν κόμβο και προορίζονται προς μια συγκεκριμένη κλάση, ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0,1]$. Συνεπώς σε βάθος χρόνου επιτυγχάνεται μια μέση τιμή 0.5 πελάτες/slot.

Ο ρυθμός εξυπηρέτησης των ζεύξεων λαμβάνεται αρχικά ίσος με 10 πελάτες/slot, περίπου ίσος με τον ελάχιστο απαιτούμενο για την ευστάθεια του συστήματος. Τα αποτελέσματα που δίνει ο BPA για τα χρησιμοποιούμενα σύνολα ζεύξεων δε χαρακτηρίζονται πλέον από κανενός είδους περιοδικότητα. Ωστόσο ο αριθμός των διαφορετικών συνόλων που χρησιμοποιούνται είναι ιδιαίτερα μικρός. Αυτό φαίνεται παρακάτω, όπου παρουσιάζονται τα χρησιμοποιούμενα σύνολα ζεύξεων στον Πίνακα 2 και το πλήθος των χρησιμοποιήσεών τους σε διάρκεια 10000 slot στο Σχήμα 2.

Χρησιμοποιούμενα Σύνολα Ζεύξεων						
A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ	Z
0	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0

Πίνακας 2: Εφαρμογή του BPA στο “N1” για μέσο ρυθμό αφίξεων 0.5 πελάτες/slot σε κάθε κόμβο προς κάθε κλάση



Σχήμα 2: Αριθμός εμφανίσεων των αντίστοιχων συνόλων

Από το προηγούμενο παράδειγμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι ουσιαστικά η εξυπηρέτηση των πελατών πραγματοποιείται ενεργοποιώντας ως επί το πλείστον έναν μικρό αριθμό από σύνολα ζεύξεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τρία σύνολα ζεύξεων αναλαμβάνουν να προωθήσουν την πληροφορία στον προορισμό της. Στα επόμενα τα σύνολα αυτά των ζεύξεων που χρησιμοποιούνται περισσότερο θα αναφέρονται ως ένα “schedule”.

Στις προηγούμενες δύο παρατηρήσεις, δηλαδή στην περιοδικότητα για σταθερούς ρυθμούς ζήτησης ζεύξεων και στην επαναλαμβανόμενη χρήση κάποιων συνόλων ζεύξεων, βασίστηκε η ακόλουθη εναλλακτική χρήση του BPA. Για το επιθυμητό δίκτυο χρησιμοποιείται ο BPA ώστε να υπολογιστούν κάποια ενδεικτικά schedule, τα οποία αποθηκεύονται σε μια βιβλιοθήκη από schedule. Κατά τη λειτουργία του δικτύου, οι αποφάσεις για τη δρομολόγηση των πακέτων λαμβάνονται χρησιμοποιώντας κάποια από αυτά τα έτοιμα schedule, εφόσον πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια.

4. Εναλλακτική Χρήση του BPA

4.1. Δημιουργία Βιβλιοθήκης για το Δίκτυο

Σε αυτό το αρχικό στάδιο χρησιμοποιείται ο BPA και υπολογίζονται τα schedule που δύνανται να εξυπηρετήσουν διάφορους συνδυασμούς ζήτησης των ζεύξεων του δικτύου. Βασική προϋπόθεση αποτελεί η γνώση της τοπολογίας του δικτύου που πρόκειται να τεθεί σε λειτουργία.

Προφανώς, ανάλογα με τη μονάδα μέτρησης, η ζήτηση της κάθε ζεύξης θα είναι ένας αριθμός μεγαλύτερος ή ίσος του μηδενός. Ωστόσο, μετά από κανονικοποίηση (διαίρεση με τη μέγιστη τιμή), οι τιμές της ζήτησης των ζεύξεων ανάγονται στο διάστημα $[0,1]$.

Η βιβλιοθήκη θα είναι πληρέστερη για όσους περισσότερους συνδυασμούς ζήτησης των ζεύξεων υπολογιστούν τα αντίστοιχα schedule. Από την άλλη πλευρά η χρήση πολλών τιμών ζήτησης ανά ζεύξη αυξάνει υπέρμετρα το πλήθος των υπολογισμών και το μέγεθος της βιβλιοθήκης.

Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί ένα δίκτυο 10 ζεύξεων, το οποίο είναι ένα ιδιαίτερα μικρό δίκτυο. Έστω ότι υπολογίζονται τα schedule δεδομένου ότι η ζήτηση κάθε ζεύξης μπορεί να λάβει 11 τιμές, 0, 0.1, 0.2, 0.3,...,0.9 και 1. Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ότι ο BPA πρέπει να εφαρμοστεί για $11^{10} = 25937424601$ διαφορετικές περιπτώσεις. Συνεπώς εκτός από μεγάλο χώρο αποθήκευσης θα χρειαστεί και αρκετός χρόνος για τον υπολογισμό τόσων πολλών schedule, ενώ όσο μεγαλώνει το δίκτυο, τόσο περισσότερο θα περιπλέκεται η κατάσταση.

Για τους λόγους αυτούς, θεωρείται αρχικά ότι οι ζεύξεις του δικτύου σε κάθε χρονικό διάστημα μπορούν να βρίσκονται σε δύο μόνο καταστάσεις. Αυτές είναι η κατάσταση “ON”, στην οποία η ζεύξη έχει δεδομένα προς μετάδοση, και η κατάσταση “OFF”, στην οποία η ζεύξη δεν έχει, ή έχει ελάχιστα, δεδομένα προς μετάδοση.

Για την παράσταση αυτών των δύο καταστάσεων σε όρους δικτύου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές 1 πελάτης/slot (κατάσταση “ON”) και 0 πελάτες/slot (κατάσταση “OFF”). Ωστόσο, για λόγους που θα γίνουν ξεκάθαροι στη συνέχεια και σχετίζονται με τον τρόπο που λαμβάνεται η απόφαση για το schedule που τίθεται σε εφαρμογή κατά τη λειτουργία του δικτύου, χρησιμοποιείται η εξής αντιστοίχιση:

- κατάσταση “ON” : 0.9 πελάτες/slot
- κατάσταση “OFF” : 0.1 πελάτες/slot

Επομένως, προκύπτουν 2^N δυνατές καταστάσεις για το δίκτυο, όπου N ο αριθμός των ζεύξεων.

Για καθεμιά από αυτές τις καταστάσεις των ζεύξεων του δικτύου πραγματοποιείται η εξής διαδικασία:

Αρχικά εφαρμόζεται ο BPA σε διάρκεια 100 slot. Στο τέλος κάθε slot, προστίθεται επιπλέον φορτίο για εξυπηρέτηση στην κάθε ζεύξη. Το μέγεθος του φορτίου είναι είτε 0.9 είτε 0.1 πελάτες, ανάλογα με την κατάσταση της ζεύξης στη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται. Συνεπώς προκύπτουν 100 σύνολα ενεργών ζεύξεων, ένα για κάθε slot λειτουργίας.

Από τα αποτελέσματα που δίνει ο BPA αποθηκεύονται εκείνα τα σύνολα τα οποία χρησιμοποιούνται για περισσότερα από το 5% των slot, δηλαδή για περισσότερα από 5 slot. Συγκεκριμένα αποθηκεύονται σε φθίνουσα σειρά ανάλογα με το ποσοστό χρήσης τους. Αυτή η ακολουθία συνόλων ενεργών ζεύξεων αποτελεί πλέον το schedule της συγκεκριμένης κατάστασης.

Με τον τρόπο αυτό αντιστοιχίζεται σε καθεμιά από τις 2^N καταστάσεις του δικτύου ένα schedule, το οποίο μπορεί να αποτελείται από 1 έως k σύνολα ζεύξεων, όπου το k είναι γενικά μικρός αριθμός.

Ένας παράγοντας που πρέπει να καθοριστεί κατά την εφαρμογή του BPA είναι ο ρυθμός εξυπηρέτησης των ζεύξεων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου ρυθμού εξυπηρέτησης των ζεύξεων ενός δικτύου ώστε αυτό να παραμένει σε ισορροπία όταν είναι γνωστή η ζήτηση για την κάθε ζεύξη, περιγράφεται στο “Link Scheduling in Polynomial Time”. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης που χρησιμοποιείται τελικά πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος από αυτόν το ρυθμό.

Μετά από παρατήρηση προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρησιμοποιούμενος ρυθμός εξυπηρέτησης, τόσο μικρότερος είναι ο αριθμός των συνόλων που απαρτίζουν το κάθε schedule. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός εξυπηρέτησης, τόσο περισσότερο απλοποιούνται τα σύνολα των ζεύξεων που χρησιμοποιούνται για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του συστήματος, κάτι που κάνει την επιλογή των schedule πιο ευέλικτη κατά τη λειτουργία του δικτύου.

Με τον τρόπο που περιγράφηκε δημιουργείται μια λίστα από schedule, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε διαφορετικό συνδυασμό ζήτησης για τις ζεύξεις του δικτύου.

4.2. Run-time Environment

Η διαδικασία που περιγράφηκε μέχρι στιγμής αφορά στην προεργασία που απαιτείται πριν τη λειτουργία του δικτύου, ώστε να δημιουργηθεί η κατάλληλη βιβλιοθήκη schedule για το συγκεκριμένο δίκτυο. Κατά τη λειτουργία του συστήματος, ακολουθείται διαδικασία παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στον BPA. Η διαφορά έγκειται στον τρόπο λήψης της απόφασης για το χρησιμοποιούμενο σύνολο ενεργών ζεύξεων σε κάθε χρονικό διάστημα.

Στην αρχή του πρώτου χρονικού διαστήματος για το οποίο λειτουργεί το δίκτυο, υπολογίζονται τα βάρη $D_i(t)$ για κάθε ζεύξη, με τρόπο ίδιο με αυτόν του BPA. Στη συνέχεια κανονικοποιούνται ως προς τη μονάδα (διαιρώντας όλα τα βάρη με το μεγαλύτερο από αυτά) και στρογγυλοποιούνται. Μετά από αυτό σε κάθε ζεύξη αντιστοιχεί μια τιμή 0 (“OFF”), ή 1 (“ON”).

Από τη βιβλιοθήκη που έχει δημιουργηθεί για το δίκτυο, επιλέγεται εκείνο το schedule που αντιστοιχεί σε αυτό το συνδυασμό “ON” – “OFF” ζεύξεων, και εφαρμόζεται για τα επόμενα slot.

Έστω ότι το συγκεκριμένο schedule περιλαμβάνει n σύνολα από συνδυασμούς ενεργών ζεύξεων. Τότε για αυτό και για τα υπόλοιπα $(n-1)$ χρονικά διαστήματα εφαρμόζεται το εν λόγω schedule, σε κάθε slot το αντίστοιχο σύνολο ζεύξεων. Τα βάρη των ζεύξεων επαναυπολογίζονται σε κάθε slot με σκοπό να επιλεγεί η κατάλληλη κλάση πελατών που θα εξυπηρετηθεί από την αντίστοιχη ενεργή ζεύξη.

Όταν περάσουν τα n slot, στην αρχή του $(n+1)$ χρονικού διαστήματος γίνεται, με βάση τις τρέχουσες ουρές αναμονής κάθε κλάσης σε όλους τους κόμβους, ο υπολογισμός για τα βάρη των ζεύξεων του δικτύου. Ακολουθώντας τη διαδικασία

που περιγράφηκε, επιλέγεται ένα schedule που θα εφαρμοστεί για τα επόμενα m χρονικά διαστήματα, κοκ.

Σε αυτό το σημείο γίνεται πιο ξεκάθαρος ο λόγος για τον οποίο αντί για 0 και 1 πελάτες/slot χρησιμοποιούνται για την παράσταση των καταστάσεων “OFF” – “ON” των ζεύξεων του δικτύου οι ρυθμοί ζήτησης 0.1 και 0.9 πελάτες/slot αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου μια ζεύξη έχει συνεχή και πολύ μεγάλη ζήτηση, ενώ οι υπόλοιπες έχουν μικρή ζήτηση, τότε μετά την κανονικοποίηση αυτή η ζεύξη θα λαμβάνει την τιμή “1”, ενώ οι υπόλοιπες την τιμή “0”. Εάν είχε χρησιμοποιηθεί η τιμή 0 πελάτες/slot για την παράσταση της κατάστασης “OFF” κατά τη δημιουργία της βιβλιοθήκης του δικτύου αυτό θα σήμαινε ότι οι υπόλοιπες ζεύξεις δεν έχουν καθόλου ζήτηση, ενώ στην πραγματικότητα έχουν ζήτηση, μόνο που αυτή είναι πολύ μικρή. Με τον τρόπο αυτό συμμετέχουν στο schedule και οι ζεύξεις με πολύ μικρή ζήτηση, έχοντας όμως εξασφαλισμένη τη λειτουργία της ζεύξης με τη μεγάλη ζήτηση.



4.3. Περιογή Λειτουργίας

Η περιογή λειτουργίας του δικτύου, σε σχέση με την περίπτωση που ο BPA εφαρμοζόταν απευθείας για την επιλογή των ενεργών ζεύξεων, περιορίζεται για τρεις λόγους:

- Κατά τη διαδικασία δημιουργίας της βιβλιοθήκης των schedule για το επιθυμητό δίκτυο θεωρούνται μόνο δύο τιμές ζήτησης για κάθε ζεύξη, ενώ στην πραγματικότητα είναι άπειρες.
- Στη βιβλιοθήκη του δικτύου αποθηκεύονται εκείνα τα σύνολα ζεύξεων που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον, ενώ τα υπόλοιπα παραλείπονται.
- Κατά τη λειτουργία του δικτύου τα σύνολα των ζεύξεων που ενεργοποιούνται σε κάθε slot δεν ανταποκρίνονται ακριβώς στις ανάγκες του δικτύου. Ουσιαστικά με κάθε επιλεγόμενο schedule γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης του schedule που θα επιλεγόταν από τον BPA παρακολουθώντας τις ουρές αναμονής των κόμβων.

4.4. Συνοπτική Παρουσίαση του Alternative BPA

Συγκεντρωτικά, τα βήματα που περιλαμβάνει ο Alternative Back – Pressure Algorithm (ABPA), είναι τα παρακάτω:

I. Δημιουργία της βιβλιοθήκης schedule του επιθυμητού δικτύου.

Αν N ο αριθμός των ζεύξεων του δικτύου τότε με εφαρμογή του BPA υπολογίζονται και αποθηκεύονται 2^N διαφορετικά schedule. Κάθε schedule είναι μια ακολουθία από 1 ή περισσότερων συνόλων ζεύξεων, που μπορούν να ενεργοποιηθούν ταυτόχρονα.

II. Κατά τη λειτουργία του δικτύου, στην αρχή κάθε slot υπολογίζονται βάρη για κάθε ζεύξη. Για κάθε κλάση j και για κάθε ζεύξη i , υπολογίζεται η ποσότητα:

$$D_{ij}(t) = \begin{cases} (X_{q(i)j}(t-1) - X_{h(i)j}(t-1)) \cdot m_i, & h(i) \notin V_j \\ X_{q(i)j}(t-1) \cdot m_i, & h(i) \in V_j \end{cases}$$

Το βάρος κάθε ζεύξης επιλέγεται ως εξής:

$$D_i(t) = \max_{j=1, \dots, J} \{D_{ij}(t)\}$$

Αν δεν υπάρχει κάποιο ήδη χρησιμοποιούμενο schedule τότε τα βάρη των ζεύξεων κανονικοποιούνται ως προς τη μονάδα, διαιρώντας με το μεγαλύτερο από αυτά, και στρογγυλοποιούνται ώστε σε κάθε ζεύξη να αντιστοιχεί μια

τιμή “0” ή “1”. Στη συνέχεια επιλέγεται το αντίστοιχο schedule από τη βιβλιοθήκη του δικτύου.

Το πρώτο από την ακολουθία των συνόλων των ζεύξεων εξάγεται ώστε να μην επαναχρησιμοποιηθεί. Αν αυτό ήταν το τελευταίο σύνολο της ακολουθίας στην αρχή του επόμενου slot θα βρεθεί νέο schedule.

Ενεργοποιούνται οι ζεύξεις που καθορίζονται από το συγκεκριμένο σύνολο ζεύξεων.

Εξυπηρετούνται οι κλάσεις πελατών για τις οποίες υπολογίστηκαν τα βάρη $D_i(t)$.

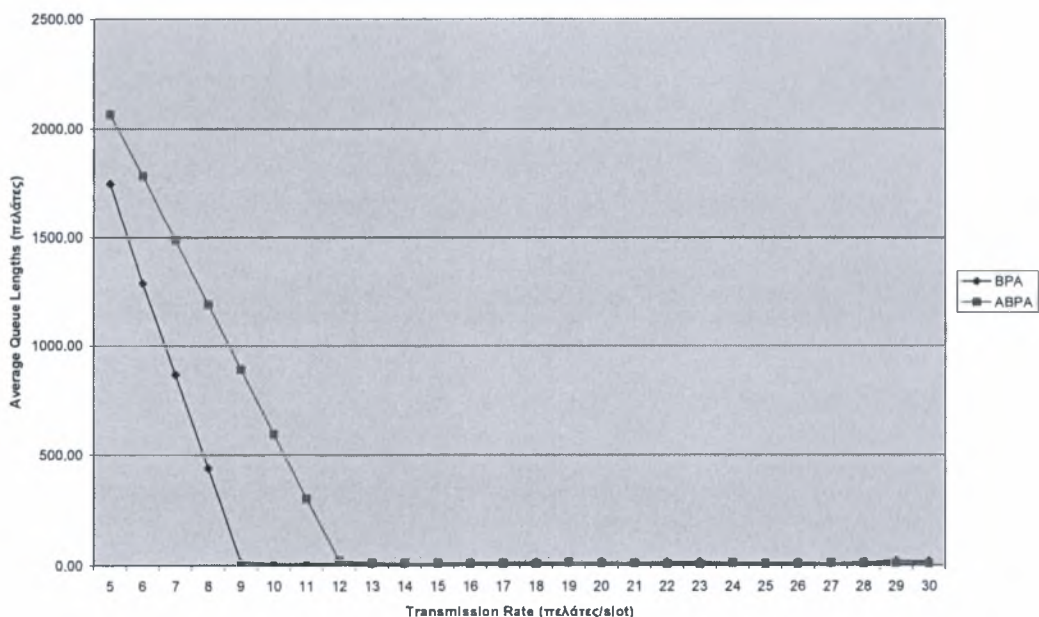
Τέλος προστίθεται το επιπλέον φορτίο στις ουρές αναμονής των κόμβων.

5. Παραδείγματα και Συγκρίσεις

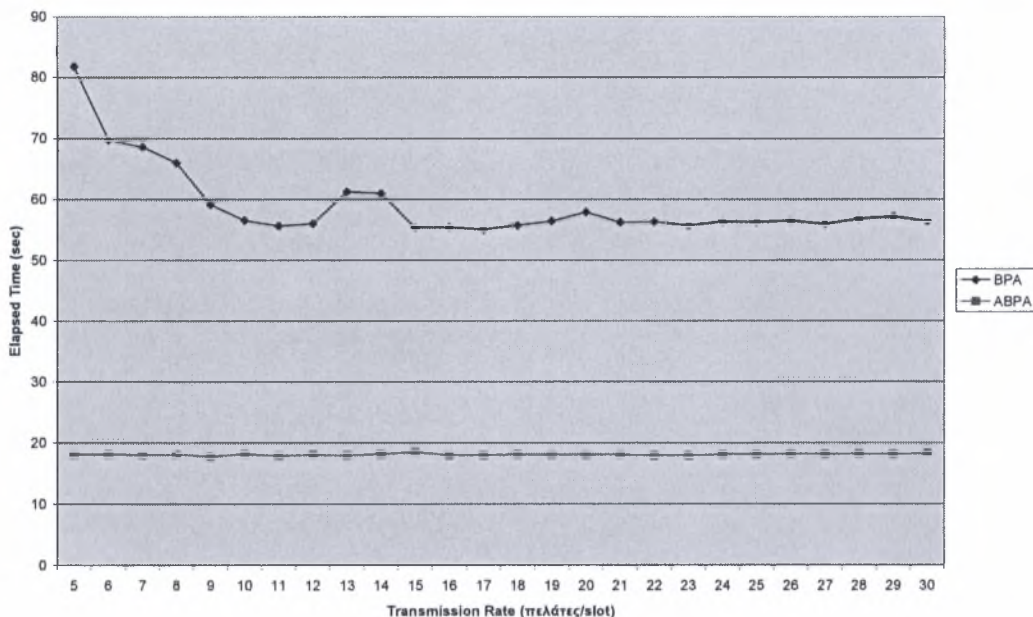
5.1. Δίκτυο “N1”

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που δίνουν οι δύο διαφορετικές εκδοχές χρήσης του BPA. Για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εξυπηρέτησης των ζεύξεων συγκρίνονται το μέσο μήκος των τελικών ουρών αναμονής μετά από 10000 slot στους κόμβους των δικτύων και ο χρόνος σε sec που χρειάστηκε για να εκτελεστεί κάθε διαδικασία.

Το πρώτο δίκτυο που χρησιμοποιείται είναι το δίκτυο “N1” που αναφέρθηκε και προηγουμένως. Σε κάθε χρονικό διάστημα εισάγεται σε κάθε κόμβο πληροφορία προς όλους τους υπόλοιπους κόμβους με ρυθμό που έχει σε βάθος χρόνου μέση τιμή 0.5 πελάτες/slot. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης κάθε ζεύξης λαμβάνει τιμές από 5 πελάτες/slot έως 30 πελάτες/slot.



Σχήμα 3: Μέσο μήκος ουρών αναμονής συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης των ζεύξεων



Σχήμα 4: Χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας συναρτήσεως του ρυθμού μετάδοσης των ζεύξεων

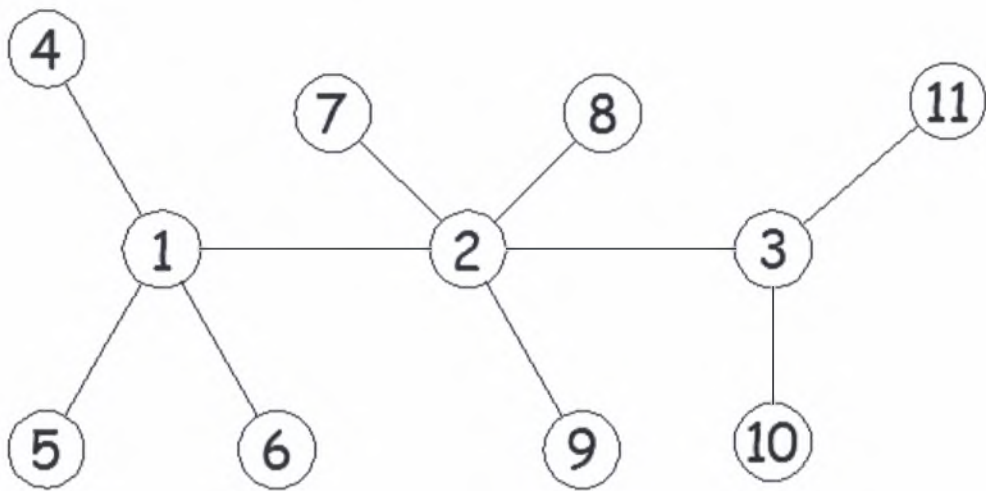
Από το Σχήμα 3 φαίνεται ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία όταν ο ρυθμό εξυπηρέτησης είναι περίπου ίσος με 9 πελάτες/slot, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο BPA. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο BPA με τον τρόπο που περιγράφηκε στην Ενότητα 4, ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης είναι ίσος με 12 πελάτες/slot.

Ωστόσο στο Σχήμα 4 γίνεται ξεκάθαρος ο λόγος χρήσης του BPA με εναλλακτικό τρόπο. Σε αυτήν την περίπτωση για να ολοκληρωθούν οι διαδικασίες δρομολόγησης του δικτύου για 10000 slot απαιτούνται περίπου 18 sec. Εάν όμως εφαρμοστεί ο BPA ως έχει τότε για τον ίδιο αριθμό από slot απαιτούνται τουλάχιστον 56 sec. Στο χρονικό αυτό διάστημα με την εναλλακτική χρήση του BPA θα μπορούσε το σύστημα να λειτουργήσει ευσταθώς για 30000 slot. Γίνεται επομένως πιο αποδοτικός σε σχέση με την πολυπλοκότητα ο ABPA.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν έχουν σημασία οι πραγματικές τιμές των χρόνων, αλλά η σχέση μεταξύ τους. Αυτό διότι αν η υλοποίηση είχε γίνει σε κάποιον άλλον υπολογιστή το πιο πιθανό είναι οι τιμές αυτές να διέφεραν από αυτές που παρατίθενται στην παρούσα εργασία.

5.2. Δίκτυο “N2”

Στη συνέχεια ακολουθούν παρόμοιες συγκρίσεις για το δίκτυο “N2”, το οποίο προσομοιώνει καλύτερα την τοπολογία ενός ασυρμάτου δικτύου. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 11 κόμβους και 10 ζεύξεις, που επικοινωνούν επιλεκτικά μεταξύ τους.

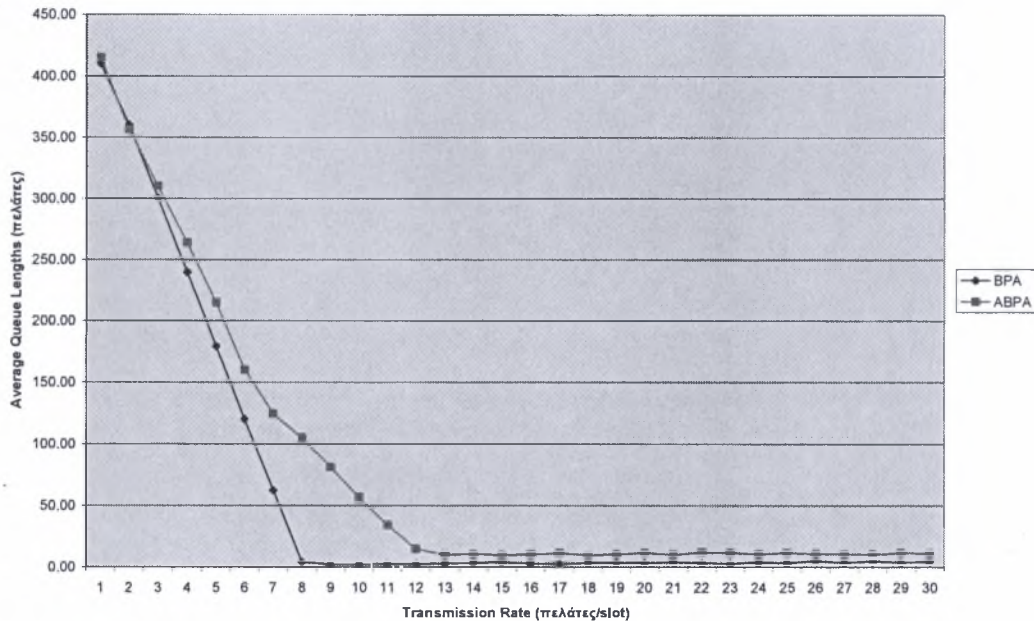


Σχήμα 5: Τοπολογία Δικτύου “N2”

Στο δίκτυο αυτό, ο κόμβος 4 επικοινωνεί (ανταλλάσσει πληροφορία) με τον κόμβο 10, ο κόμβος 5 με τον κόμβο 9, ο κόμβος 6 με τον κόμβο 11 και ο κόμβος 7 με τον 8. Υπάρχει συνεχής ροή πληροφορίας από κάθε κόμβο προς τον αντίστοιχό του, με μέση τιμή σε βάθος χρόνου 0.5 πελάτες/slot. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του BPA με τους δύο τρόπου φαίνονται παρακάτω.

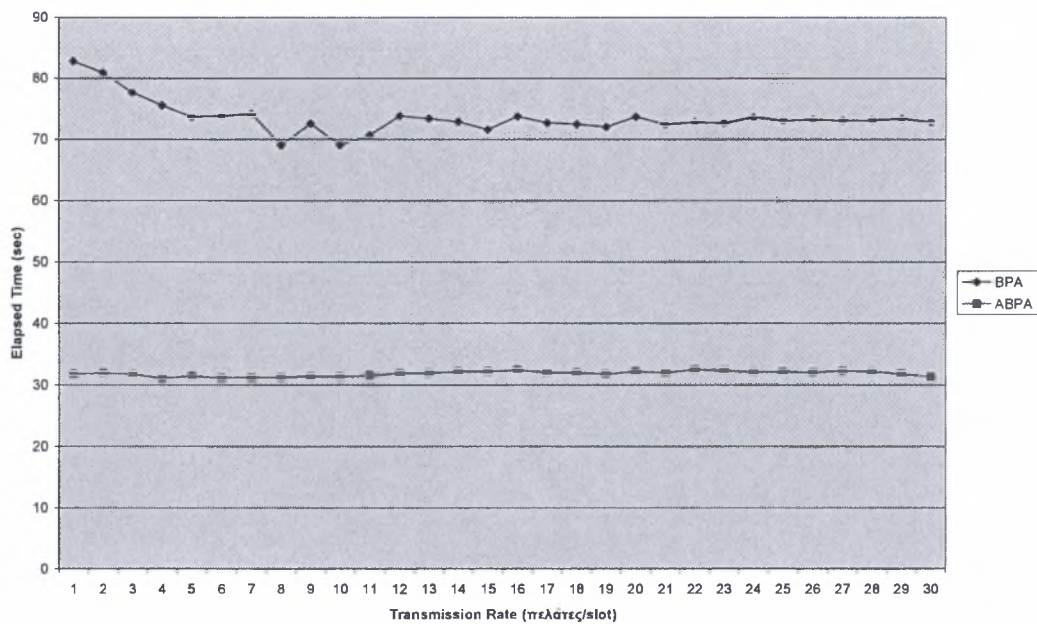
Στο παράδειγμα αυτό ακολουθείται μια λίγο διαφορετική εκδοχή του ABPA. Κατά τη δημιουργία της βιβλιοθήκης του δικτύου δεν αποθηκεύονται σε κάθε

schedule μόνο τα σύνολα των ζεύξεων που χρησιμοποιούνται περισσότερο, αλλά όλα τα σύνολα που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή του BPA, όπως περιγράφεται πιο αναλυτικά στον αλγόριθμο.



Σχήμα 6: Μέσο μήκος ουρών αναμονής συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης των ζεύξεων

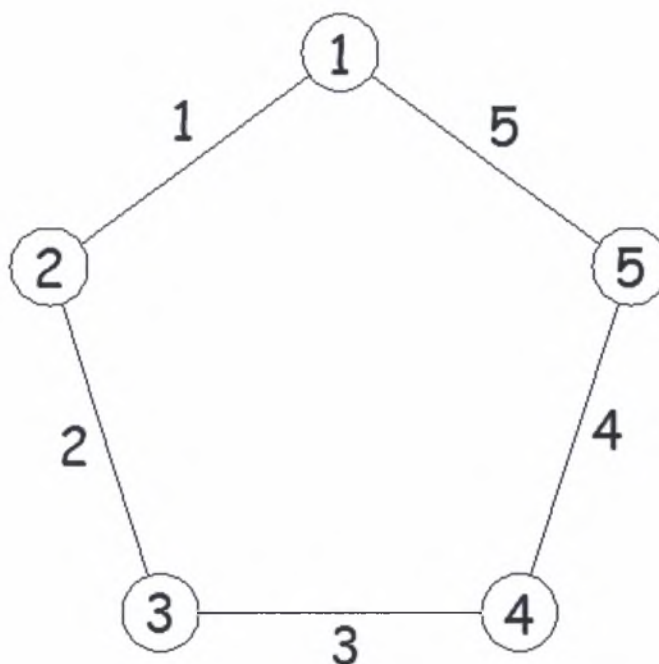
Παρατηρείται και πάλι ότι όταν ο BPA χρησιμοποιείται ως έχει, τότε δίνει ευσταθή αποτελέσματα για το σύστημα για μικρότερο ρυθμό εξυπηρέτησης των ζεύξεων (περίπου 8 πελάτες/slot). Ωστόσο το χρονικό πλεονέκτημα που υπάρχει όταν χρησιμοποιείται με τον εναλλακτικό τρόπο (φαίνεται στο επόμενο σχήμα) είναι πολύ σημαντικό. Επίσης με τον εναλλακτικό τρόπο εμφανίζεται μια σταθερότητα στη χρονική διάρκεια που χρειάζεται στο σύστημα να λειτουργήσει για συγκεκριμένο αριθμό slot.



Σχήμα 7: Χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας συναρτήσεως του ρυθμού μετάδοσης των ζεύξεων

5.3. Ring Network

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των ΒΡΑ και ΑΒΡΑ σε ένα μικρό δίκτυο, το οποίο έχει τοπολογία δακτυλίου. Αποτελείται από 5 κόμβους και 5 ζεύξεις. Η ακριβής τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 8.

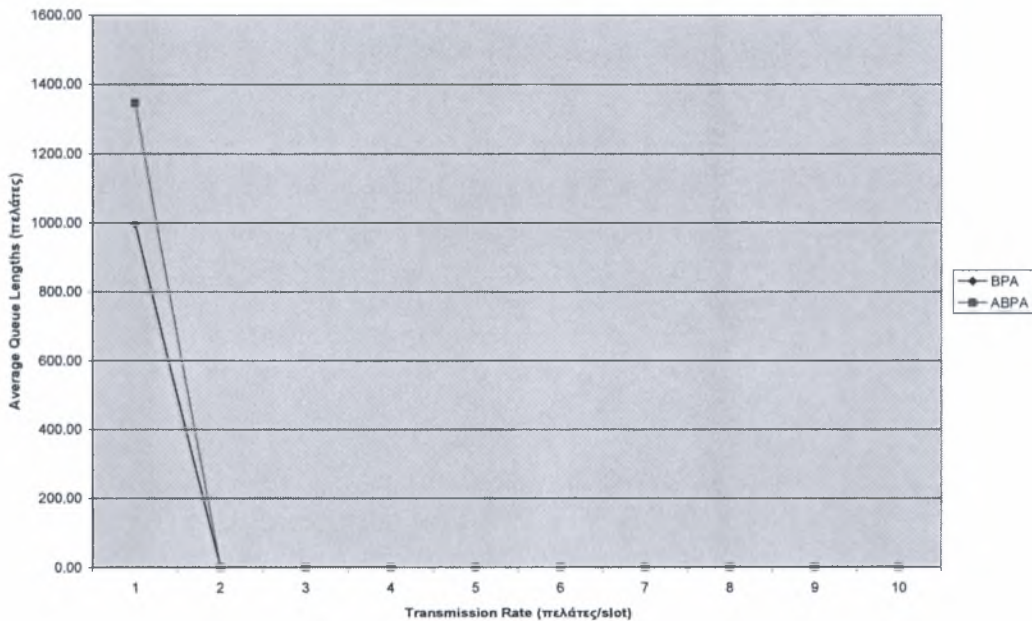


Σχήμα 8: Τοπολογία Ring Network

Αρχικά θεωρείται ότι από κάθε κόμβο εισάγεται στο τέλος κάθε slot πληροφορία για τον αμέσως επόμενο του, κατά την αριστερόστροφη φορά, δηλαδή από τον κόμβο 1 για τον 2, από τον κόμβο 2 για τον 3, κ.ο.κ. Το μέγεθος της

πληροφορίας θεωρείται τυχαία μεταβλητή με ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0,1]$. Συνεπώς, σε βάθος χρόνου θα έχει μέση τιμή 0.5 πελάτες/slot.

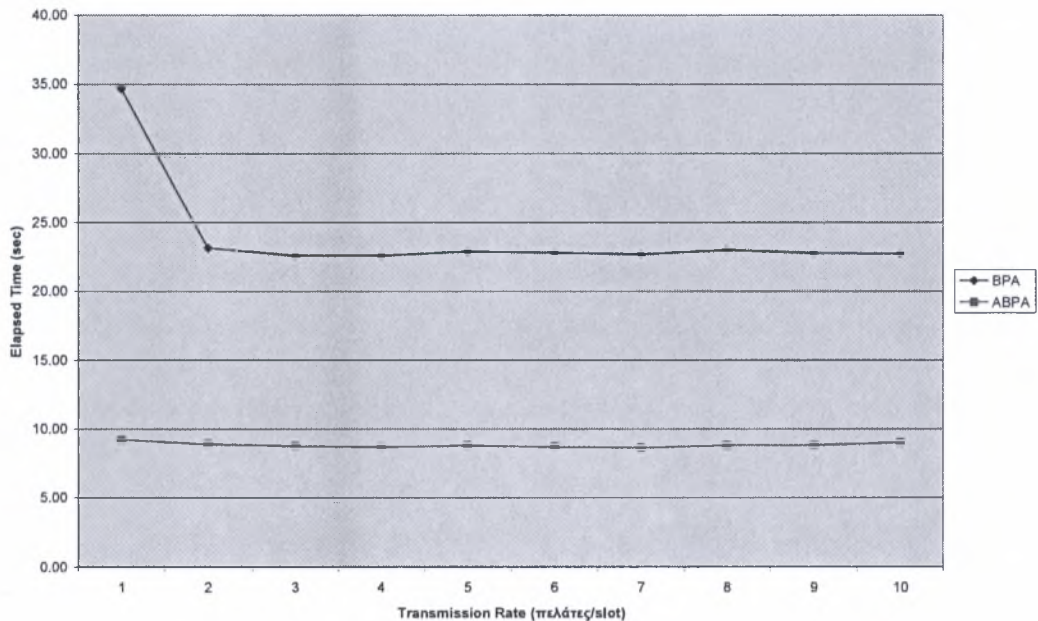
Οι δύο αλγόριθμοι εφαρμόζονται διαδοχικά στο δίκτυο, για ρυθμούς εξυπηρέτησης των ζεύξεων από 1 έως 10 πελάτες/slot. Για κάθε τιμή του ρυθμού εξυπηρέτησης των ζεύξεων καταγράφεται τόσο το μέσο μήκος των ουρών αναμονής των κόμβων του δικτύου μετά από 10000 slot λειτουργίας, όσο και ο χρόνος σε sec που χρειάστηκε ο υπολογιστής για να εκτελέσει την προσομοίωση της λειτουργίας του δικτύου για τα συγκεκριμένα slot. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 9: Μέσο μήκος ουρών αναμονής συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης των ζεύξεων

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 9, στην περίπτωση αυτού του απλού δικτύου ο ABPA εγγυάται την ευστάθεια του συστήματος για ρυθμό εξυπηρέτησης των ζεύξεων ίσο περίπου με τον ελάχιστο που απαιτεί και ο BPA.

Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μικρό αριθμό από διαφορετικά σύνολα ζεύξεων που μπορούν να λειτουργήσουν στο δίκτυο, οπότε και ο ABPA δύναται να παρακολουθήσει καλύτερα τις μεταβολές στις ουρές αναμονής των κόμβων του δικτύου.



Σχήμα 10: Χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας συναρτήσεως του ρυθμού μετάδοσης των ζεύξεων

Παρότι οι δύο αλγόριθμοι απαιτούν τον ίδιο ελάχιστο ρυθμό εξυπηρέτησης για τις ζεύξεις του δικτύου, ώστε αυτό να παραμένει σε ευστάθεια, δε συμβαίνει το ίδιο για το χρόνο που απαιτείται ώστε να ολοκληρωθεί η εφαρμογή τους για 10000 slot. Συγκεκριμένα, ο χρόνος κατά μέσο όρο που απαιτείται από τον BPA είναι περίπου τριπλάσιος του αντίστοιχου χρόνου του ABPA. Το γεγονός αυτό, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι αποτέλεσμα της πολυπλοκότητας των υπολογισμών που πρέπει να πραγματοποιηθούν σε κάθε slot κατά την εφαρμογή του BPA.

Το απλό αυτό δίκτυο είναι χρήσιμο ώστε να καταδειχθεί η διαφορά μεταξύ του BPA και του ABPA στη λήψη των αποφάσεων για τις ζεύξεις που θα λειτουργήσουν. Συγκεκριμένα ο BPA σε κάθε slot επιλύει ένα maximum weight matching problem με βάση το φορτίο των ουρών αναμονής των κόμβων. Συνεπώς σε κάθε slot υπολογίζει το βέλτιστο σύνολο ζεύξεων που μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο.

Από την άλλη μεριά, ο ABPA εξαιτίας διάφορων απλουστεύσεων τόσο κατά τη δημιουργία της βιβλιοθήκης του δικτύου, όσο και κατά τη λήψη αποφάσεων για τις ζεύξεις που θα ενεργοποιηθούν (Παρ. 4.3), προσπαθεί να προσεγγίσει τα σύνολα ζεύξεων που θα ενεργοποιούσε ο BPA, παρακολουθώντας τις ουρές αναμονής των κόμβων. Η διαδικασία αυτή φαίνεται πιο ξεκάθαρα στους επόμενους πίνακες. Σε αυτούς καταγράφονται τα σύνολα των ζεύξεων που ενεργοποιήθηκαν τόσο από τον BPA, όσο και από τον ABPA για το Ring Network σε διάρκεια 100 slot. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης των ζεύξεων είναι 4 πελάτες/slot, ενώ για τους ρυθμούς αφίξεων και τους προορισμούς της κάθε ροής πληροφορίας ισχύουν τα προαναφερθέντα.

bpa	slot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	links	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
2	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
3	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1
4	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
5	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1

abpa	slot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	links	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1
2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
3	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
5	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0

Πίνακας 3: Εφαρμογή των BPA και ABPA στο Ring Network για τα πρώτα 15 slot

bpa	slot	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	links	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
		2	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
		3	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0
		4	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
		5	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0

abpa	slot	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	links	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
		2	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
		3	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
		4	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
		5	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0

Πίνακας 4: Εφαρμογή των BPA και ABPA στο Ring Network για τα slot 16 έως 30

bpa	slot	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
	links	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1
		2	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
		3	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
		4	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
		5	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

abpa	slot	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
	links	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0
		2	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
		3	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
		4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
		5	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0

Πίνακας 5: Εφαρμογή των BPA και ABPA στο Ring Network για τα slot 31 έως 45

bpa	slot	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
	links	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
		2	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0
		3	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
		4	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
		5	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0

abpa	slot	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
	links	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
		2	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1
		3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
		4	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
		5	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1

Πίνακας 6: Εφαρμογή των ΒΡΑ και ΑΒΡΑ στο Ring Network για τα slot 46 έως 60

bpa	slot	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	
	links	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
		2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
		3	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
		4	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
		5	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0

abpa	slot	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	
	links	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0
		2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
		3	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0
		4	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
		5	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1

Πίνακας 7: Εφαρμογή των ΒΡΑ και ΑΒΡΑ στο Ring Network για τα slot 61 έως 75

bpa	slot	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	
	links	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
		2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
		3	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
		4	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
		5	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0

abpa	slot	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	
	links	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
		2	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
		3	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
		4	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1
		5	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Πίνακας 8: Εφαρμογή των BPA και ABPA στο Ring Network για τα slot 76 έως 90

bpa	slot	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
	links	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
		2	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
		3	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
		4	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
		5	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0

abpa	slot	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
	links	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1
		2	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
		3	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
		4	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
		5	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0

Πίνακας 9: Εφαρμογή των BPA και ABPA στο Ring Network για τα slot 91 έως 100

Στους προηγούμενους πίνακες, κάθε στήλη αντιστοιχεί σε ένα slot λειτουργίας του δικτύου και παριστάνει το σύνολο των ζεύξεων που ενεργοποιήθηκε για το συγκεκριμένο slot. Με “1” παριστάνονται οι ζεύξεις που ενεργοποιήθηκαν. Η

αρίθμηση των ζεύξεων από 1 έως 5 αντιστοιχεί σε αυτή του Σχήματος 8. Συνεπώς κάθε γραμμή του πίνακα δείχνει την κατάσταση της αντίστοιχης ζεύξης στα διάφορα slot.

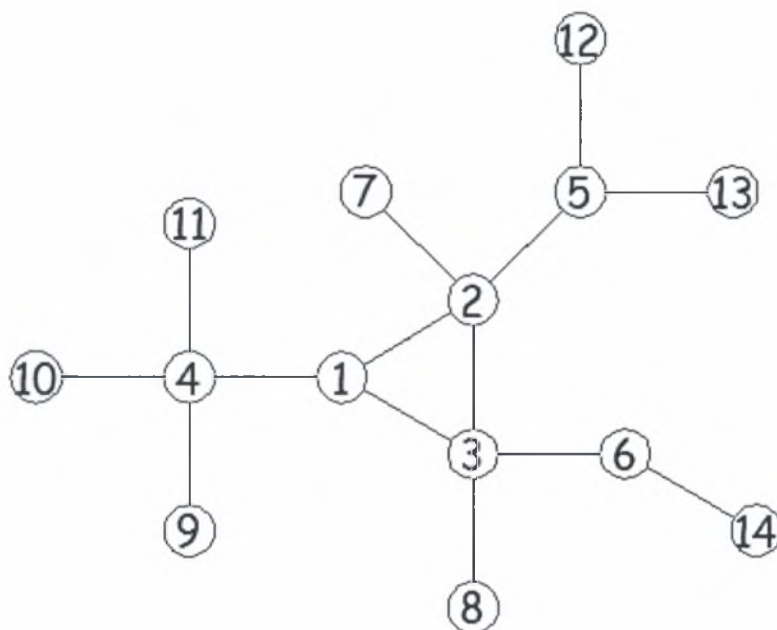
Με έντονη γραμματοσειρά φαίνονται οι ζεύξεις που για τα ίδια slot ενεργοποιούνται και από τους δύο αλγορίθμους. Τέλος, με γκρι φόντο απεικονίζονται τα σύνολα των ζεύξεων που για τα ίδια slot ενεργοποιούνται τόσο από τον BPA όσο και από τον ABPA.

Παρατηρείται ότι για τα 29 από τα 100 slot τα σύνολα των ζεύξεων που επιλέγονται από τους δύο αλγορίθμους για λειτουργία ταυτίζονται. Επίσης, για τα εναπομείναντα slot, στα 31 από αυτά (συνολικά είναι 71) η κατάσταση των τριών από τις πέντε ζεύξεις ταυτίζεται και στους δύο αλγορίθμους.

Επομένως παρά το μικρό ποσοστό της πλήρους ταύτισης των αποτελεσμάτων των δύο αλγορίθμων, ο ABPA προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την ακολουθία των schedule που ενεργοποιεί ο BPA.

5.4. Δίκτυο “N3”

Το τελευταίο δίκτυο που θα εξεταστεί είναι το δίκτυο “N3”. Η τοπολογία του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 11: Τοπολογία δικτύου “N3”

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, αποτελείται από 14 κόμβους, αντίστοιχο αριθμό ζεύξεων και είναι το μεγαλύτερο από όσα έχουν εξεταστεί μέχρι στιγμής. Σκοπός της χρήσης του είναι να φανεί εάν ο ABPA μπορεί να δώσει ευσταθή αποτελέσματα σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο στο οποίο δεν είναι προκαθορισμένοι οι ρυθμοί εισόδου της πληροφορίας στους διάφορους κόμβους.

Οι κόμβοι του δικτύου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη από αυτές περιλαμβάνει τους κόμβους 1,2,3,4,5 και 6 οι οποίοι χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη δρομολόγηση της πληροφορίας στον προορισμό της. Από αυτούς δεν εισέρχονται επιπλέον πελάτες στο δίκτυο.

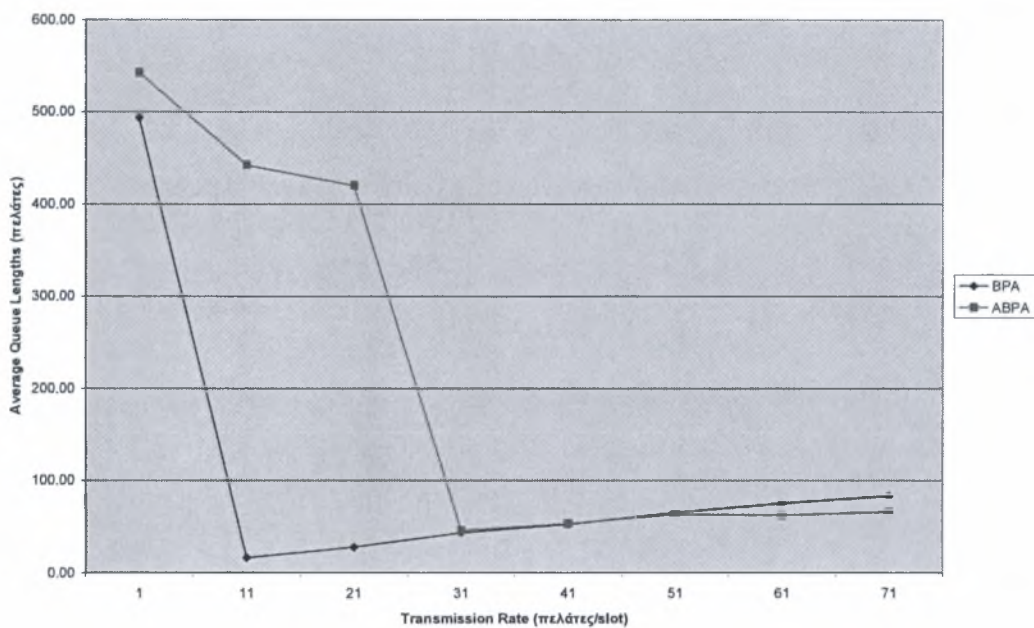
Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τους κόμβους 7,8,9,10,12 και 14, οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν ως τερματικοί κόμβοι. Διοχετεύουν στο δίκτυο πληροφορία με προορισμό άλλους τερματικούς κόμβους και ταυτόχρονα λαμβάνουν πληροφορία από αυτούς. Ωστόσο, ο ρυθμός με τον οποίο εισάγουν τελικά φορτίο στο δίκτυο είναι τυχαίος, αφού μπορεί για κάποιο διάστημα να μην αποστέλλουν καθόλου και για κάποιο άλλο να αποστέλλουν με μέγιστο ρυθμό.

Τέλος υπάρχει και η τρίτη κατηγορία κόμβων στην οποία ανήκουν οι κόμβοι 11 και 13. Οι κόμβοι αυτοί συμπεριφέρονται κατά το ήμισυ ως τερματικοί, αφού μπορούν να αποστέλλουν πληροφορία προς τους υπόλοιπους τερματικούς με τυχαίο τρόπο. Ωστόσο κανένας τερματικός κόμβος δε στέλνει σε αυτούς πληροφορία. Ο λόγος για αυτό το χαρακτηριστικό θα φανεί στη συνέχεια και έχει να κάνει με το γεγονός ότι κάποια στιγμή, και ενώ το δίκτυο είναι σε λειτουργία, οι κόμβοι αυτοί θα αφαιρεθούν διαδοχικά.

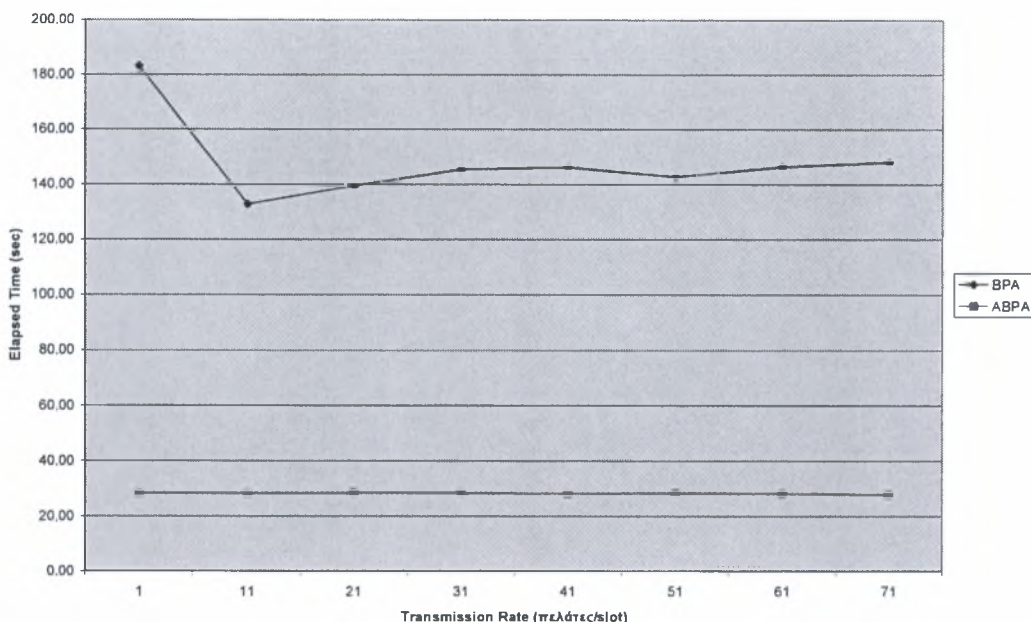
Αν είχε επιτραπεί να στέλνεται σε αυτούς πληροφορία τότε μετά την απομάκρυνσή τους το φορτίο που προοριζόταν για αυτούς θα εγκλωβιζόταν στο δίκτυο, δημιουργώντας προβλήματα στην ορθή δρομολόγηση των υπόλοιπων πελατών. Αυτό θα συνέβαινε διότι δεν υπάρχει μηχανισμός απομάκρυνσης των πακέτων μετά από κάποιο χρόνο ή κάποια βήματα¹ στο δίκτυο, εφόσον αυτά δεν έχουν φτάσει στον προορισμό τους.

¹ Με τον όρο “βήμα” εννοείται η μετάδοση ενός πακέτου από έναν ενδιάμεσο κόμβο σε κάποιον άλλο με σκοπό να φτάσει στον προορισμό του.

Αρχικά, για την τοπολογία του σχήματος 11, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των δύο αλγορίθμων για διάφορους ρυθμούς εξυπηρέτησης των ζεύξεων. Θεωρείται ότι οι μέσες τιμές των ουρών αναμονής των κόμβων του συστήματος και ο χρόνος που απαιτείται ώστε να ολοκληρωθεί η εκάστοτε διεργασία αντιστοιχούν σε λειτουργία του συστήματος για 10000 slot. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 12: Μέσο μήκος ουρών αναμονής συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης των ζεύξεων



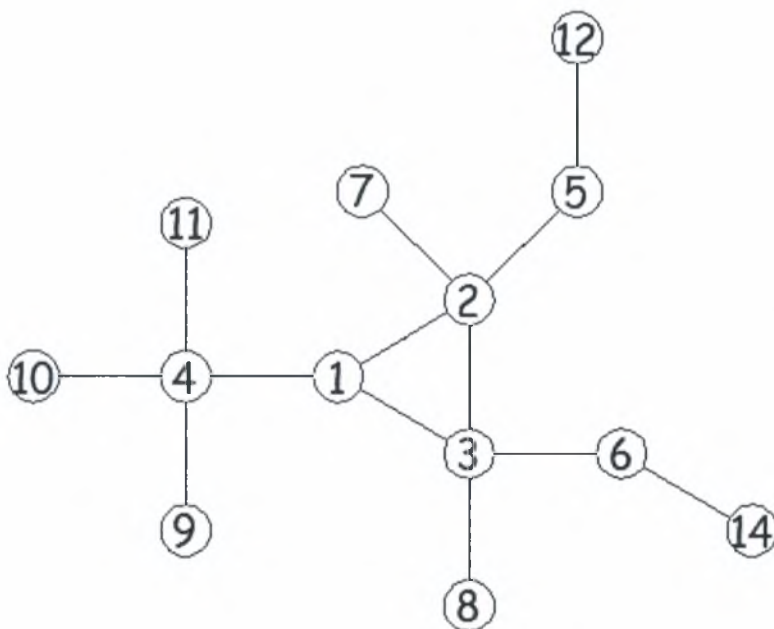
Σχήμα 13: Χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας συναρτήσεως του ρυθμού μετάδοσης των ζεύξεων

Από το σχήμα 12 εξάγεται το συμπέρασμα ότι πλέον ο ABPA δίνει ευσταθή αποτελέσματα σχετικά με το μήκος των ουρών αναμονής για ρυθμό εξυπηρέτησης των ζεύξεων μεγαλύτερο από 30 πελάτες/slot. Ο BPA απαιτεί οι ζεύξεις να εξυπηρετούν με τουλάχιστον 10 πελάτες/slot, δηλαδή με πολύ μικρότερο ρυθμό (το 1/3 του ρυθμού που απαιτεί ο ABPA). Αυτό συμβαίνει κυρίως εξαιτίας της πολύ μικρής πυκνότητας του δικτύου, ή αλλιώς λόγω της μικρής συνδεσιμότητάς του, κάτι που δίνει λίγες επιλογές ως προς τη δρομολόγηση των πακέτων στον προορισμό τους.

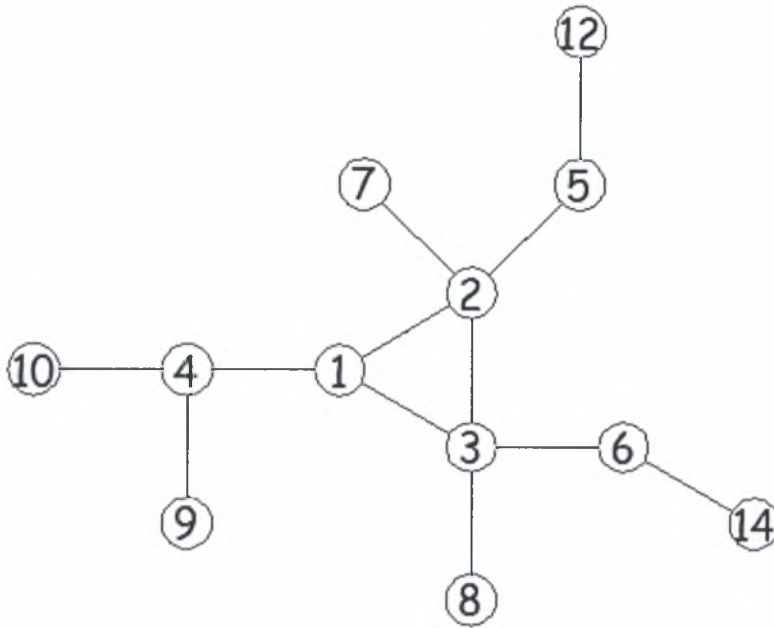
Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης λειτουργίας του δικτύου για 10000 slot, για τους διάφορους ρυθμούς εξυπηρέτησης των ζεύξεων, είναι κάτι παραπάνω από πέντε φορές μεγαλύτερος στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο BPA σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο που απαιτεί ο ABPA. Είναι προφανές ότι όσο πιο πολύπλοκο γίνεται το δίκτυο ο υπολογισμός του maximum weighted matching απαιτεί περισσότερους υπολογισμούς που καθυστερούν τη λειτουργία του συστήματος.

Στη συνέχεια θεωρείται σταθερός ο ρυθμός εξυπηρέτησης των ζεύξεων και ίσος με 40 πελάτες/slot. Η πληροφορία εισέρχεται στο δίκτυο με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγουμένως. Εφαρμόζεται αρχικά ο BPA και έπειτα ο ABPA για 90000 slot. Μετά από κάθε 10000 slot λειτουργίας υπολογίζονται τόσο το μέσο μήκος των ουρών αναμονής των κόμβων, όσο και ο χρόνος σε sec που χρειάστηκε για την ολοκλήρωσή τους.

Μετά από τα πρώτα 30000 slot ο κόμβος 13 αποσυνδέεται από το δίκτυο. Το ίδιο συμβαίνει και με τον κόμβο 11 αφού παρέλθουν 60000 slot. Η τοπολογία του δικτύου “N3” μετά από τα 30000 και 60000 slot φαίνεται στα σχήματα 14 και 15 αντίστοιχα.

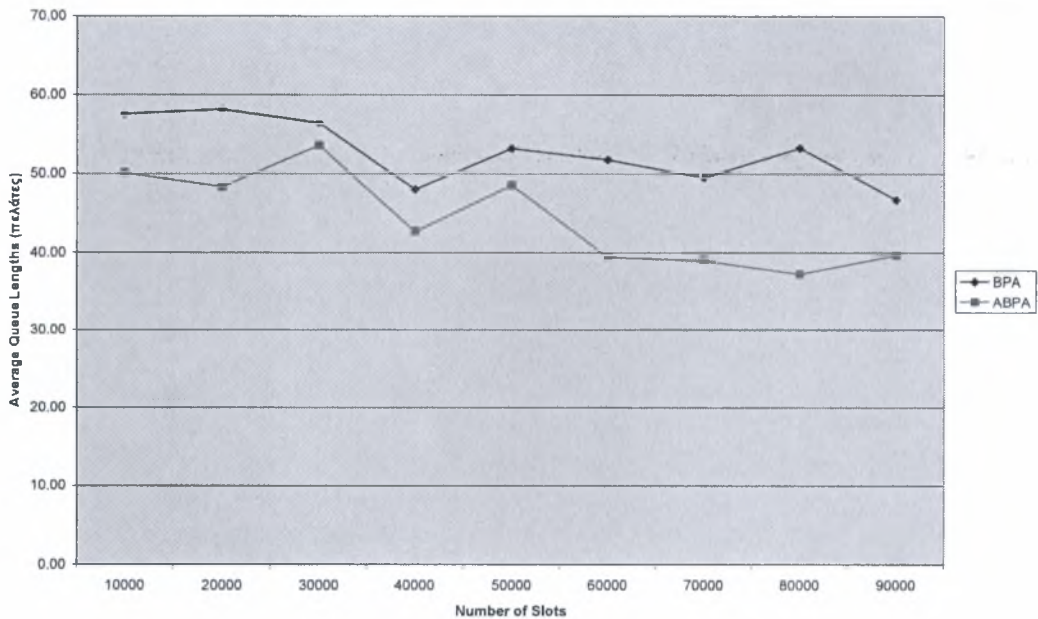


Σχήμα 14: Τοπολογία δικτύου “N3” μετά από 30000 slot λειτουργίας

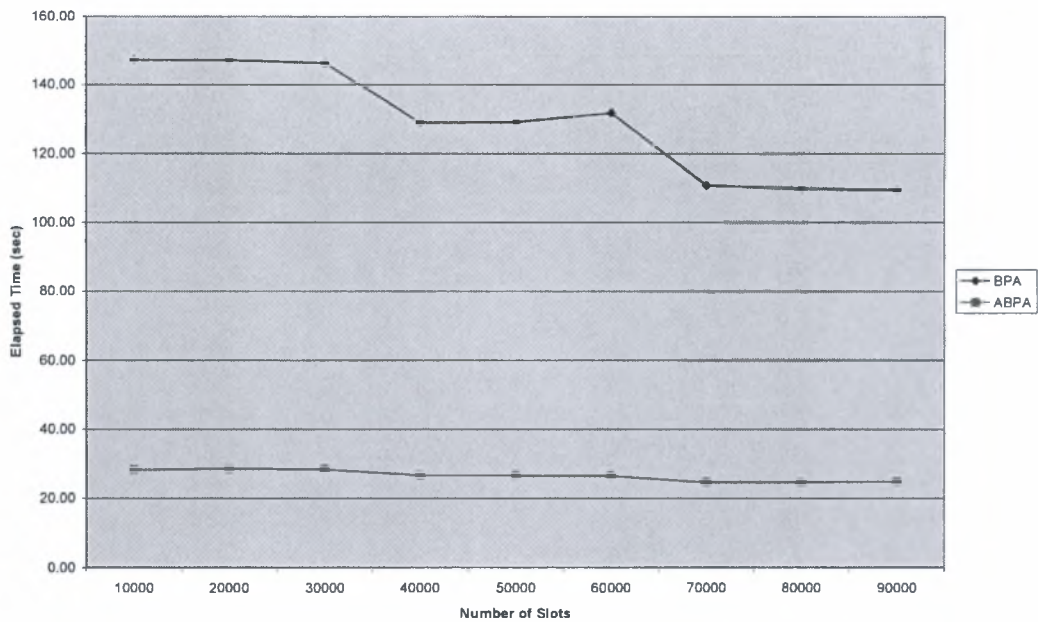


Σχήμα 15: Τοπολογία δικτύου “N3” μετά από 60000 slot λειτουργίας

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των δύο αλγορίθμων φαίνονται στα επόμενα σχήματα:



Σχήμα 16: Μέσο μήκος ουρών αναμονής συναρτήσει του αριθμού των slot λειτουργίας



Σχήμα 17: Χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας συναρτήσεως του αριθμού των slot λειτουργίας

Για μια ακόμη φορά είναι εμφανής η μεγάλη διαφορά που υπάρχει στο χρόνο που χρειάζονται για την εφαρμογή τους οι δύο αλγόριθμοι. Το γεγονός ότι ο ABPA δίνει καλύτερα αποτελέσματα στο μέσο μήκος των ουρών αναμονής πιθανόν να οφείλεται στην τυχαιότητα των ρυθμών αφίξεων των πελατών. Το σημαντικότερο συμπέρασμα είναι η δυνατότητα του ABPA να εφαρμοστεί και να δώσει ευσταθή αποτελέσματα σε βάθος χρόνου, σε ένα δίκτυο η τοπολογία του οποίου μεταβάλλεται με το χρόνο και οι ρυθμοί αφίξεων δεν είναι σταθεροί και προκαθορισμένοι.

6. Συμπεράσματα και Επεκτάσεις

Με την παρούσα εργασία επιχειρείται μια διαφορετική προσέγγιση της χρήσης του BPA. Η απλοποίηση της διαδικασίας έγινε σε βάρος της περιοχής ευστάθειας που προσφέρει ο ABPA. Όπως φάνηκε και από τα παραδείγματα ο ABPA μπορεί να προσφέρει σημαντική μείωση στο χρόνο που απαιτείται για την επιλογή του κατάλληλου συνόλου ζεύξεων που θα ενεργοποιηθούν.

Ωστόσο, ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου και τους ρυθμούς εισόδου της πληροφορίας στο δίκτυο υπάρχει και η απαίτηση για μεγαλύτερο ρυθμό εξυπηρέτησης των ζεύξεων από τον ABPA σε σχέση με τον BPA.

Ένα άλλο στοιχείο που δυσκολεύει τη χρήση του ABPA είναι η δημιουργία της βιβλιοθήκης του δικτύου. Στην περίπτωση που το δίκτυο αποτελείται από μεγάλο αριθμό ζεύξεων απαιτείται ένας πολύ μεγάλος αριθμός υπολογισμών.

Συνεπώς τρεις περιοχές έρευνας που μπορούν να βελτιώσουν την εφαρμογή του ABPA. Η πρώτη περιοχή αφορά την εύρεση κάποιας μεθόδου ώστε στην περίπτωση ενός πολύ μεγάλου δικτύου να γίνεται τμηματικά ο υπολογισμός της βιβλιοθήκης και στη συνέχεια τα επιμέρους κομμάτια να ενώνονται σε μια ενιαία λίστα από schedule.

Επίσης, πεδίο έρευνας μπορεί να αποτελέσει το κριτήριο επιλογής των συνόλων ζεύξεων που τελικά επιλέγονται ώστε να συμμετάσχουν στο εκάστοτε schedule. Τέλος ο μαθηματικός προσδιορισμός της περιοχής λειτουργίας που μπορεί να εγγραφεί ο ABPA αποτελεί πρόκληση και συνιστά την τρίτη περιοχή έρευνας σχετικά με το συγκεκριμένο αλγόριθμο.

7. Βιβλιογραφία

- **L. Tassiulas and A. Ephremides (1992)**. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximal throughput in multihop radio networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(12):1936-1948.
- **B. Hajek and G. Sasaki (1988)**. Link scheduling in polynomial time. *IEEE Transactions on Information Theory*, 34(5):910-917.
- **E. L. Lawler (1976)**. Combinatorial optimization: Networks and matroids. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- **C. H. Papadimitriou and K. Steiglitz (1998)**. Combinatorial optimization: Algorithms and Complexity. New York: Dover Publications, INC.
- **R. K. AHUJA, T. L. MAGNANTI and J. B. Orlin (1993)**. Network flows: Theory, algorithms and applications. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.