

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 3, 2026 vol. 3

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 3, ISSUE 3

SEPTEMBER, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 3 SEPTEMBER, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Methods for analyzing complex electrical circuits

A.A. Rakhmonberdiyev¹ 

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract:

This article presents a detailed study and comparative analysis of three main methods for analyzing complex electrical circuits: the nodal potential method, the loop current method, and the state variable method. The analysis made it possible to identify the strengths and weaknesses of each method, as well as their applicability and efficiency under various conditions.

Despite the widespread use of the nodal potential method and the loop current method, they require the solution of parametric matrices and integro-differential equations, which makes their application labor-intensive and time-consuming. In contrast, the state variable method demonstrates high efficiency and accuracy in analyzing circuits with nonlinear elements by formulating a system of first-order differential equations without the need to process parametric matrices.

The state variable method significantly simplifies the analysis of complex electrical circuits and reduces computational time. Thus, this method is the most suitable for analyzing complex electrical circuits, providing fast and accurate evaluation with minimal resource consumption, which confirms its advantage for practical application in the field of automation and telemechanics in railway transport.

Keywords:

methods of analysis of complex electrical circuits, mathematical modeling, method of nodal potentials, method of loop currents, method of state variables, Kirchhoff's laws of currents and voltages, parametric matrix, topological matrix, transposed matrix

Murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish usullari

Raxmonberdiyev A.A.¹ 

¹Toshkent davlat transport universiteti, Tashkent, O'zbekiston

Annotatsiya:

Mazkur maqolada murakkab elektr sxemalarni tahlil qilishning uchta asosiy usuli: tugun potentsiallari usuli, kontur toklar usuli va holat o'zgaruvchilari usulining batafsil o'rganilishi va solishtirma tahlili amalga oshirildi. Tahlil har bir usulning kuchli va zaif tomonlarini, shuningdek, ularning qo'llanilishi va samaradorligini turli sharoitlarda aniqlash imkonini berdi.

Tugun potentsiallari usuli va kontur toklar usulining keng qo'llanilishiga qaramay, ular parametrik matritsalarini va integratsion-differensial tenglamalarni yechishni talab qiladi, bu esa ularning qo'llanilishini mehnat talab qiladigan va vaqtni talab qiladigan holga keltiradi. Ulardan farqli o'laroq, holat o'zgaruvchilari usuli, chiziqli bo'lmagan elementlarga ega bo'lgan sxemalarni tahlil qilishda yuqori samaradorlik va aniqlikni namoyish etadi, parametrik matritsalarini qayta ishlashsiz birinchi tartibli differensial tenglamalar tizimini shakllantiradi.

Holat o'zgaruvchilari usuli murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish jarayonini sezilarli darajada soddalashtiradi va vaqt sarfini kamaytiradi. Shunday qilib, ushbu usul murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish uchun eng maqbul usul bo'lib, resurslarni minimal sarflab, tez va aniq baholashni ta'minlaydi, bu uning temir yo'l transportida avtomatika va telemexanika sohasida amaliy qo'llanish uchun afzalligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar:

murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish usullari, matematik modellashtirish, tugun potentsiallari usuli, kontur toklar usuli, holat o'zgaruvchilari usuli, Kirxgofning tok va kuchlanish qonunlari, parametrik matritsa, topologik matritsa, transpozitsiyalangan matritsa

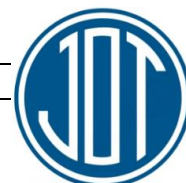
1. Kirish

So'nggi yillarda elektr energetika tizimlari, xususan, murakkab strukturaga ega elektr sxemalarni matematik modellashtirish va tahlil qilish masalalari dolzarb ilmiy-texnik yo'nalishlardan biri sifatida rivojlanib bormoqda. Bunday tizimlarning murakkabligi ularning tarkibida chiziqli va chiziqsiz elementlar, energiya to'plovchi reaktiv

komponentlar hamda o'zaro kuchli bog'langan tarmoqlarning mavjudligi bilan izohlanadi. Shu sababli, elektr zanjirlarni aniq va ishonchli tahlil qilish uchun universal va samarali matematik usullarni qo'llash zarur hisoblanadi.

Hozirgi kunda murakkab elektr sxemalarni tahlil qilishda tugun potentsiallari usuli, kontur toklar usuli hamda holat o'zgaruvchilari usuli keng qo'llaniladigan asosiy

 <https://orcid.org/0009-0006-0585-7582>



klassik yondashuvlar sifatida e'tirof etiladi. Ushbu usullar elektr zanjirlarning statik va dinamik holatlarini modellashtirish, o'tish jarayonlarini tahlil qilish hamda barqarorlik mezonlarini aniqlashda muhim ahamiyat kasb etadi. Ularning matematik asosini Kirxgof qonunlari hamda elementlarning volt-ampere xarakteristikalarini tashkil etadi [1-3].

Elektr sxemalarni formal ifodalashda graf nazariyasi muhim rol o'ynaydi, bunda sxema elementlari tugunlar va tarmoqlar orqali ifodalanadi. Yo'naltirilgan graf asosida shakllantirilgan model elektr zanjirning topologik tuzilmasini to'liq aks ettiradi. Ushbu topologik model asosida tugunlar va konturlar uchun inkidensiya hamda bog'lanish matritsalarini tuziladi, bu esa elektr zanjirni vektor-matritsali ko'rinishda ifodalash imkonini beradi.

Mazkur matematik yondashuvda elektr sxema tenglamalari parametrik matritsalar asosida shakllantiriladi, bunda har bir elementning fizik parametrlari (qarshilik, induktivlik, sig'im va boshqalar) alohida hisobga olinadi [1-3]. Natijada hosil bo'lgan yuqori tartibli algebraik va differensial tenglamalar tizimi zamonaviy sonli usullar yordamida yechiladi. Biroq, amaliy hisoblash jarayonida ushbu tizimlarning murakkabligi hisoblash resurslariga bo'lgan talabni oshiradi va algoritmik jihatdan sezilarli qiyinchiliklar tug'diradi.

Shu nuqtayi nazardan, elektr sxemalarni tahlil qilish usullarining matematik tuzilmasini chuqur o'rganish, ularning hisoblash samaradorligini baholash hamda murakkab tizimlar uchun eng optimal yondashuvni aniqlash dolzarb ilmiy muammo hisoblanadi. Ayniqsa, chiziqli elementlarni o'z ichiga olgan sxemalarda an'anaviy usullarning cheklovlarini kamaytirish va hisoblash jarayonini optimallashtirish muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Shuning uchun ushbu ishda murakkab elektr sxemalarni tahlil qilishning asosiy usullari chuqur tahlil qilinib, ularning matematik asoslari, qo'llanilish sohalari hamda hisoblash samaradorligi o'rganiladi.

2. Tadqiqot metodologiyasi

Tugun potentsiallari va Kontur toklar usullari

Tugun potentsiallari usuli. Tugun potentsiallari usuli tadqiq qilinayotgan elektr zanjirda tugunlar soni mustaqil konturlar soniga teng yoki undan kam bo'lgan hollarda qo'llaniladi [2]. Ushbu usul sxemadagi barcha tugun potentsiallari uchun vektor-matritsali tenglamani olish imkonini beradi. Bunda tugun nuqtalarining potentsiallar vektori ($V^Y(t)$) quyidagi ko'rinishga ega:

$$V^Y(t) = -(A \cdot Y \cdot A^T)^{-1} \cdot A \cdot \Theta \quad (1)$$

Bu yerda: A – tugunlar matritsasi; Y – o'tkazuvchanliklarning diagonal matritsasi; A^T – A matritsasining transponirlangan ko'rinishi; Θ – kuchlanish manbalari toklarining noma'lum qiymatlari vektori.

(1) tenglamadagi satrlar soni ($N^Y - 1$) ga teng bo'lib, bu yerda N^Y – tugunlar soni. Ushbu tenglama integro-differensial tenglamalar tizimini ifodalaydi. Bu tenglamalarda sig'imlardagi toklar kuchlanishning hosilasi orqali, induktivliklardagi toklar esa mos reaktiv elementlar kuchlanish funksiyalarining integrali orqali aniqlanadi.

Kontur toklar usuli. Keyingi usul – kontur toklar usuli bo'lib, u murakkab elektr zanjirlarni hisoblashning asosiy usullaridan biri hisoblanadi va amaliyotda keng qo'llaniladi

[3]. Ushbu usulning mohiyati shundan iboratki, tarmoqlardagi toklar o'rniga Kirxgofning ikkinchi qonuniga asosan konturlarda yopiluvchi kontur toklar aniqlanadi.

Kontur toklar usulida barcha kontur toklariga nisbatan tenglamalar tizimi qo'llaniladi. Kontur toklar vektori ($I^C(t)$) quyidagi ifoda bilan aniqlanadi (2):

$$I^C(t) = -(B \cdot Z \cdot B^T)^{-1} \cdot B \cdot v \quad (2)$$

Bu yerda: Z – elementlar qarshiliklarining diagonal matritsasi; v – tok manbalari kuchlanishlarining noma'lum kattaliklari vektori; B – konturlar matritsasi; B^T – B matritsasining transponirlangan ko'rinishi.

(2) ifoda vektor-matritsali tenglama bo'lib, unda graf bog'lanishlarining barcha kontur toklari aniqlanadi.

Kontur toklar usulidan foydalanish tugun potentsiallari usulidan foydalanishdagi kabi parametrik matritsalariga murojat qilishni talab etadi – birinchi holatda ($A \cdot Y \cdot A^T$), ikkinchi holatda ($B \cdot Z \cdot B^T$). Matritsalarini teskari aylantirish (inversiyalash) barcha matritsali amallar ichida eng murakkab va vaqt talab qiladigan jarayon hisoblanadi.

Holat o'zgaruvchilari usuli

Ma'lumki, sxemaning holati reaktiv elementlarda to'plangan energiya hamda mustaqil tok va kuchlanish manbalari bilan aniqlanadi. Kondensator zaryadi va induktivlik g'altaklarining magnit oqim bog'lanishi holat o'zgaruvchilari hisoblanadi. Sig'imlardagi kuchlanishlar va induktivliklardagi toklar, agar ularning qiymatlari o'zgarmas bo'lsa, holat o'zgaruvchilari sifatida qabul qilinadi.

Holat o'zgaruvchilari usuli yordamida induktivliklardagi kuchlanishlar va sig'imlardagi toklar, shuningdek, sxemaning noreaktiv elementlaridagi kuchlanish va toklar ($y(t)$) holat o'zgaruvchilari ($x(t)$) hamda mustaqil tok va kuchlanish manbalari ($u(t)$) orqali ifodalanadi.

Agar mustaqil tok va kuchlanish manbalari ma'lum bo'lsa va holat o'zgaruvchilarining boshlang'ich qiymatlari ($x(t)$) berilgan bo'lsa, u holda (3) va (4) tenglamalar yordamida noreaktiv elementlardagi kuchlanish va toklar vektori – $y(t)$, shuningdek boshlang'ich vaqt momenti uchun induktivliklardagi kuchlanishlar va sig'imlardagi toklar aniqlanadi.

$$\dot{x}(t) = f_1[x(t), u(t)], \quad (3)$$

$$y(t) = f_2[x(t), u(t)]. \quad (4)$$

Differensial tenglama (4) ni yechish orqali ma'lum vaqt oralig'ining oxiri (integratsiya qadami) uchun holat o'zgaruvchilari vektori $x(t)$ aniqlanadi. Olingan $x(t)$ qiymati keyingi integratsiya qadami uchun boshlang'ich qiymat sifatida qabul qilinadi. Ushbu jarayon berilgan iteratsiyalar sonigacha takrorlanadi [1].

Kontur-tarmoq topologik matritsasi (F -matritsa) holat o'zgaruvchilari usuli algoritmining asosini tashkil etadi. Kirxgofning tok va kuchlanish qonunlari F -matritsa orqali ifodalanadi:

$$U^C(t) = -F \cdot U^B \quad (5)$$

$$I^B(t) = F^T \cdot I^C \quad (6)$$

u yerda:

$U^C(t)$, $I^C(t)$ – sxemaning yo'nalgan grafidagi bog'lanishlar kuchlanish va toklar vektorlari; $U^B(t)$, $I^B(t)$ – tarmoqlar kuchlanish va toklar vektorlari; F^T – F matritsasining transponirlangan ko'rinishi.

Murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish usullarini asosiy xususiyatlar bo'yicha solishtirish

Murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish usullari asosiy xususiyatlari bo'yicha solishtirildi. Yuqorida ko'rib



chiqilgan usullarni taqqoslash natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish usullarining solishtirma jadvali

Usullarning asosiy xususiyatlari	Murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish usullari		
	“Tugun potentsiallari usuli”	“Kontur toklar usuli”	“Holat o‘zgaruvchilari usuli”
Kirxgofning tok va kuchlanish qonunlarini qo‘llash	Ha	Ha	Ha
Integro-differensial tenglamalarni qo‘llash	Ha*	Ha*	Yo‘q
Parametrik matritsalaridan foydalanish	Ha**	Ha**	Yo‘q
Topologik matritsa	Yo‘q	Yo‘q	Ha
Katta vaqt sarfini talab qilmaydi	Yo‘q	Yo‘q	Ha
Birinchi tartibli differensial tenglamalar tizimini olish imkoniyati	Yo‘q	Yo‘q	Ha
Chiziqliq elementlarga qo‘llanishi	Cheklangan	Cheklangan	Yuqori
Tenglamalarni yechish murakkabligi	Murakkabligi yuqori (matritsani teskari qilish talab etiladi)	Murakkabligi yuqori (matritsani teskari qilish talab etiladi)	Murakkab emas (matritsani teskari qilish talab etilmaydi)
Tahlil aniqligi	Tahlil aniqligi yuqori, ammo mehnat talab qiladi	Tahlil aniqligi yuqori, ammo mehnat talab qiladi	Tahlil aniqligi yuqori va samarali
Afzalliklari	Aniqlik, nazariyada qo‘llanishi	Aniqlik, nazariyada qo‘llanishi	Yuqori samaradorlik va aniqlik, foydalanish qulayligi, tez hisoblash
Kamchiliklari	Murakkabligi yuqori bo‘gani uchun mehnat talab etadi, vaqt sarfi katta	Murakkabligi yuqori bo‘gani uchun mehnat talab etadi, vaqt sarfi katta	Sezilarli kamchiliklari yo‘q

Izohlar:

*Integrall-differensial tenglamalar birinchi tartibli differensial tenglamalarga qaraganda murakkabroq bo‘lib, ularni yechish ko‘proq vaqt sarfini talab qiladi;

**Parametrik matritsalarini teskari aylantirish matritsalar ustidagi barcha amallar ichida eng mehnat talab qiladigan operatsiya bo‘lib, ko‘p vaqt sarflashni talab qiladi.

Holat o‘zgaruvchilari usulida differensial tenglamalar soni sxemadagi reaktiv elementlar soniga teng. Holat o‘zgaruvchilari usulining afzalligi shundaki, u parametrik matritsalarini teskari aylantirishni talab qilmaydi va birinchi tartibli, oson yechiladigan differensial tenglamalarni olish imkonini beradi. Yuqorida keltirilgan murakkab elektr sxemalarni tahlil qilish usullarining solishtirma natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

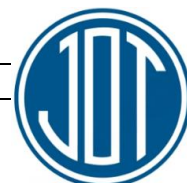
Holat o‘zgaruvchilari usulidan amaliy foydalanishga misol sifatida temir yo‘l avtomatika va telemexanika tizimlarining elektr sxemalarini va ularning energiya tizimlari bilan bog‘lanish sxemalarini, jumladan, temir yo‘lning o‘zgaruvchan tok tortish tarmog‘idagi murakkab elektromagnit jarayonlarni, ularning avtomatika va telemexanika tizimlari qurilma va elementlariga ta’sirlarini hamda ushbu ta’sirlardan himoya qilish vositalarining samaradorligini murakkab parametrik matritsalariga murojat qilmasdan turib samarali tahlil qilish imkoniyatini qo‘shish mumkin. Natijada himoya qurilmalarini loyihalash, elektromagnit moslashuvchanlikni baholash va tortish tarmoqlarida kommutatsiya rejimlarini optimallashtirish bo‘yicha ilmiy hulosalarga ega bo‘lish mumkin. [4-6] ilmiy ishlarda holat o‘zgaruvchilari usulidan samarali foydalanib olib borilgan tadqiqotlar va ularning natijalari keltirib o‘tilgan.

3. Xulosa

O‘tkazilgan tahlil shuni tasdiqladiki, holat o‘zgaruvchilari usuli murakkab elektr sxemalarini tahlil qilish uchun eng samarali va aniq usul hisoblanadi, ayniqsa chiziqliq elementlarni o‘z ichiga olgan sxemalarda. Tugun potentsiallari usuli va kontur toklar usuli parametrik matritsalarini teskari aylantirish hamda integral-differensial tenglamalarni yechishni talab qilishi bilan farqlanadi, holat o‘zgaruvchilari usuli esa birinchi tartibli differensial tenglamalar tizimini shakllantirish imkonini beradi, bu esa yechish jarayonini sezilarli darajada soddalashtiradi va vaqt sarfini kamaytiradi.

Holat o‘zgaruvchilari usulining afzalligi faqatgina yuqori aniqlik va tezkor tahlilni ta’minlash qobiliyatida emas, balki mehnat sarfi va hisoblash resurslarini kamaytirishidir. Bu esa mazkur usulni temir yo‘l avtomatika va telemexanika sohasida amaliy qo‘llash uchun ayniqsa muhim qiladi, chunki bu sohada tahlilning tezkorligi va aniqligi hal qiluvchi ahamiyatga ega.

Shunday qilib, tadqiqot natijalari holat o‘zgaruvchilari usulini murakkab elektr sxemalarini tahlil qilishda ustuvor usul sifatida qarash lozimligini ko‘rsatadi, chunki u resurslardan yanada samarali va oqilona foydalanishni ta’minlaydi.



Foydalangan adabiyotlar / References

- [1] Чахмахсаян, Е.А. Машинный анализ интегральных схем. Вопросы теории и программирования / Е.А. Чахмахсаян, Ю.Н. Бармаков, А.Э. Гольденберг. - М.: Советское радио, 1974. - 272 с.
- [2] Шакурский В.К. Теоретические основы электротехники: в 2 ч. Ч.1. Аналитические и численные методы анализа установившихся режимов в электрических цепях: учебное пособие / В.К. Шакурский. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 219 с.
- [3] Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие. 7-е изд., стер. /Г.И. Атабеков. – СПб.: Изд-во «Лань», 2009. – 592 с.
- [4] Манаков, А.Д. Опасные электромагнитные воздействия тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ на устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. / А.Д. Манаков, А.А. Рахмонбердиев // Цифровые инфокоммуникационные технологии: сборник научных трудов ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2021. – С. 162-174.
- [5] Манаков, А.Д. Опасное электромагнитное воздействие обратной тяговой сети переменного тока

напряжением 25 кВ на устройства ЖАТ / А.Д. Манаков, А.А. Рахмонбердиев // Автоматика на транспорте. – СПб., 2022. – №3, том 8, – С. 233-251. – DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-233-251.

[6] Raxmonberdiyev A.A. “O‘zbekiston temir yo‘llari” aksiyadorlik jamiyatining temir yo‘l avtomatika va telemexanika qurilmalariga ortiqcha kuchlanishlarning ta’siri / A.A. Raxmonberdiyev // Journal of Transport. – 2025. – №8, 2-jild. – 223-231 b.

Mualliflar to‘g‘risida ma’lumot/ Information about the authors

Raxmonberdiyev Abdulaziz Abdimajitovich / Abdulaziz Rakhmonberdiyev	Toshkent davlat transport universiteti “Avtomatika va telemexanika” kafedrasida dotsenti v.b. E-mail: raa19860102@mail.ru Tel.: +998990869417 https://orcid.org/0009-0006-0585-7582
---	---



A. Martazaev, S. Razzakov*Distribution of glass fibers in the concrete matrix.....177***D. Bekmirzaev, A. Sodikov***Stochastic modelling of post-earthquake evacuation risk in a student dormitory with a failed exit element.....182***N. Pashaev, S. Javadov***Electrophysical properties of nanocomposite materials based on aluminium oxide.....188***U. Khamrokulov***Scaling of precast-monolithic reinforced concrete frame building models, test program and selection of materials.....194***R. Primkulov, Kh. Umarov***Technical and economic justification of ballastless track structures under Uzbekistan's conditions.....198***M. Burikhodjaeva***Classification of methods for developing supply chains in road transport logistics.....203***M. Burikhodjaeva***Methods and priority directions for developing supply chains in automotive transport logistics within the context of Uzbekistan.....207***A. Rakhmonberdiev***Methods for analyzing complex electrical circuits.....211*