

УДК 621.311.65

Обеспечение качества электроэнергии в системах тягового электроснабжения переменного тока

А.А. Минина^а,

В.И. Пантелеев^{а*}, Е.В. Платонова^б

^а Сибирский федеральный университет,

Политехнический институт,

Россия 660049, Красноярск, Ленина, 70

^б Сибирский федеральный университет,

Хакасский технический институт – филиал

Россия 655017, Абакан, Щетинкина, 27¹

Received 13.08.2012, received in revised form 20.08.2012, accepted 27.08.2012

Выполнено математическое моделирование средств компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения. Предложена альтернативная практическая методика расчета тяговой сети, позволяющая на основе анализа частотной характеристики входного сопротивления $Z_{\text{вх}} = f(\nu)$ определять спектры токов и напряжений в элементах сети, а также оценивать уровни активных потерь и перегрузки компенсирующих устройств токами высших гармоник.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, резонансный контур, частотная характеристика, спектры токов, спектры напряжений, высшие гармоники, фильтрокомпенсирующие устройства.

В настоящее время наиболее распространенным средством компенсации реактивной мощности являются конденсаторные батареи (КБ), применение которых в тяговых сетях наряду с повышением коэффициента мощности ($\cos \phi$) вызывает затруднения в обеспечении требуемого ГОСТ 13109-97 качества напряжения по критерию несинусоидальности (коэффициента несинусоидальности напряжения $K_{\text{нсу}}$) в районных электрических сетях напряжением 35 кВ, запитанных от обмоток среднего напряжения (СН) трансформаторов тяговых подстанций [1, 2]. Снижение качества напряжения сопровождается увеличением общего уровня активных потерь, что обусловлено появлением добавочных потерь от протекания токов высших гармоник во всех элементах сети. Потери от высших гармоник в целом могут быть соизмеримы с суммарными активными потерями и представляют собой значительный потенциал для повышения энергоэффективности.

Вторым важным моментом при компенсации реактивной мощности с использованием КБ является большая вероятность развития резонансных явлений в сетях 27,5 и 35 кВ тяговых под-

* Corresponding author E-mail address: pvi0808@rambler.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

станций. Резонансный контур образуется за счёт параллельного или последовательного включения емкостных элементов КБ с индуктивными элементами (трансформаторы, питающие линии и т.д.). Эти резонансные явления ведут как к выходу из строя самих КБ, так и к резкому увеличению активных потерь в сети [3].

Причиной неэффективной работы КБ, применяемых в качестве средств компенсации реактивной мощности, является несовершенство методик расчета несинусоидальных режимов, применяемых при выборе параметров компенсирующих устройств (КУ). Нами предложена альтернативная практическая методика, позволяющая на основе анализа частотной характеристики (ЧХ) входного сопротивления сети $Z_{вх}$ определять спектры токов и напряжений в элементах сети, а также оценивать уровни активных потерь и перегрузки КУ токами высших гармоник [4, 5].

Для исследования закономерностей компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения (СЭ) целесообразно применять типовую расчетную схему с различными местами подключения нелинейной нагрузки (рис. 1).

Система электроснабжения питается через понижающий трансформатор Tr , подключенный к шинам высокого напряжения $U_{в}$ и питающий на стороне среднего напряжения $U_{с}$ линейную нагрузку (районная распределительная сеть) и нелинейную тяговую нагрузку на стороне низкого напряжения $U_{н}$. К шинам $U_{н}$ также может быть подключена линейная нагрузка $S_{н}$ (ДПР – система электроснабжения «два провода – рельс» и СЦБ – устройства сигнализации, централизации и блокировки шины) [6]. Между шинами $U_{н}$ и шинами подключения тяги $U_{н1}$ условно показано сопротивление $Z_{п}$, величина которого определяется местоположением тяговой нагрузки вдоль пути ее перемещения. Компенсация реактивной мощности осуществляется установкой на шинах $U_{н}$ и $U_{с}$ конденсаторных батарей КБ₁ и КБ₂, резонансных фильтров или фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Типовая расчетная схема предусматривает воз-

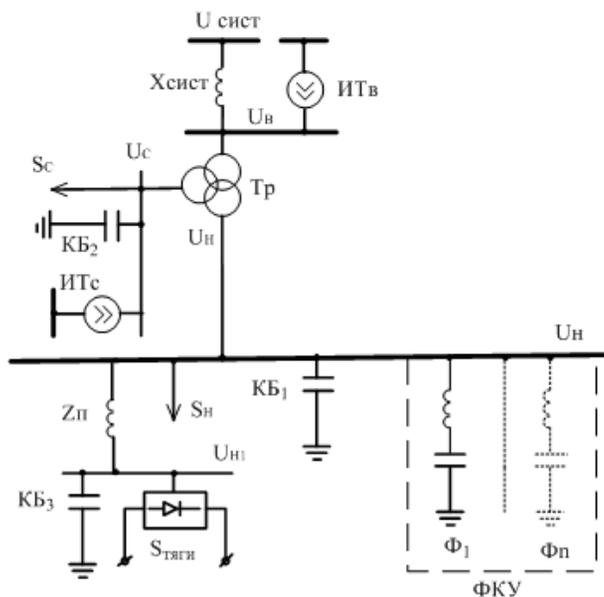


Рис. 1. Типовая расчетная схема

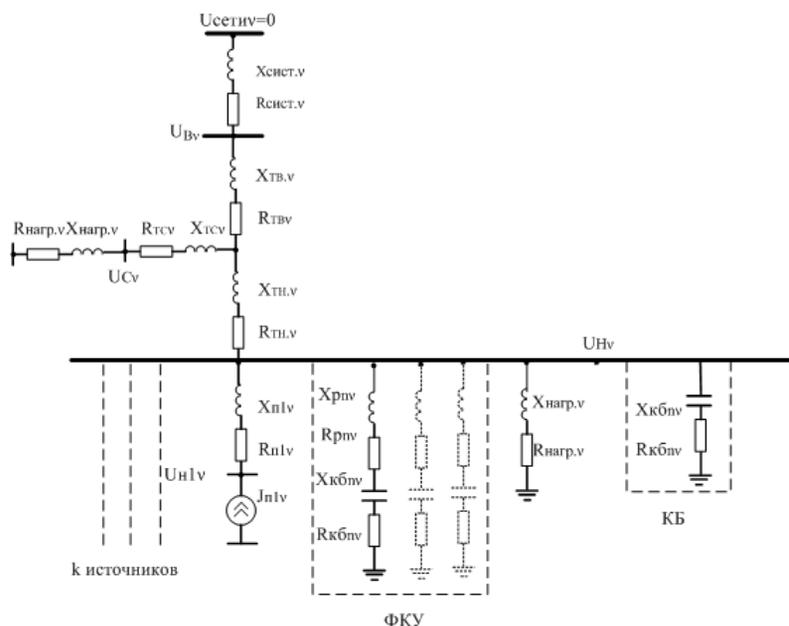


Рис. 2. Расчетная схема для определения гармоник тока и напряжения

возможность непосредственного подключения КУ к шинам $U_{н1}$ (КБ₃). Помимо преобразователей, являющихся причиной гармонических искажений напряжения, возможно проникновение высших гармоник в сеть U_c и U_n из сети высокого напряжения U_b , что задается источником тока высокого напряжения (ИТв) или в сеть U_b и U_n из сети U_c (ИТс).

Задачи расчета несинусоидальных режимов в схеме (рис. 1) при наличии нескольких нелинейных элементов и КУ являются многопараметрическими. Учитывая это, целесообразно рассматривать ряд более простых случаев выполнения компенсации только на шинах U_n , U_c или $U_{н1}$ при ограничении мест подключения нелинейной нагрузки (только один источник гармоник). Пример расчетной схемы для определения гармоник тока и напряжения приведен на рис. 2.

В расчетной схеме (рис. 2) принято, что компенсация реактивной мощности выполняется только на шинах $U_{нv}$ за счет включения КБ или ФКУ, содержащего заданное число резонансных звеньев n . К шинам $U_{нv}$ подключается к источников тока со спектрами $J_{н1v}$ в соответствии с графиком движения тяговой нагрузки. Параллельно КБ или ФКУ подключено звено ($R_{нагр.v} - X_{нагр.v}$), которое эквивалентурует все прочие нагрузки системы электроснабжения, не содержащие емкостных элементов (в том числе двигательная нагрузка, нагрузка СЦБ, ДПР и др.) [7]. С помощью приведенной расчетной схемы удобно оценивать допустимость и целесообразность подключения КБ в зависимости от величины суммарного спектра токов высших гармоник и параметров расчетной схемы, оценивать влияние состава мощности и параметров ФКУ на перегрузки фильтровых звеньев, эффективность фильтрации и активные потери в сети.

Поставленные задачи оценки качества напряжения, токовых нагрузок и активных потерь в сети сводятся к нахождению при заданных возмущениях по высшим гармоникам тока спектров $U_{нv}$ и токов I_{vi} в ветвях расчетной схемы [8].

Предлагаемая методика позволяет провести вычисления по относительным зависимостям для токов и напряжений вида

$$K_{I_i} = \frac{I_i^{(j)}}{J_{v\Sigma}^j} \text{ и } K^{(j)}_{g_v} = \frac{U_v^{(j)}}{U_{v0}^{(j)}}, \tag{1}$$

здесь $I_i^{(j)}$ – ток i -й ветви, примыкающей к j -му узлу; K_{I_i} – коэффициент, учитывающий долю тока в i -й ветви расчетной схемы по отношению к заданному току $J_{v\Sigma}^j$ от всех источников тока в j -м узле; $U_v^{(j)}$ и $U_{v0}^{(j)}$ – v -я составляющая напряжения в j -м узле соответственно при включении КУ и их отсутствии; $K^{(j)}_{g_v}$ – относительное изменение напряжения в j -м узле после включения в этом узле КУ.

Коэффициенты K_{I_i} и $K^{(j)}_{g_v}$ определяются по выражениям

$$K_{I_i} = \frac{|Z^{(j)}_{exv}|}{|Z^{(j)}_{iv}|} \text{ и } K^{(j)}_{g_v} = \frac{|Z^{(j)}_{exv}|}{|Z^{(j)}_{exv0}|} = K_{I_i} \cdot \frac{|Z^{(j)}_{iv}|}{|Z^{(j)}_{exv0}|}, \tag{2}$$

где $Z^{(j)}_{exv}$ и $Z^{(j)}_{exv0}$ – входное сопротивление относительно j -го узла, соответственно при включении и отключении КУ; $Z^{(j)}_{iv}$ – сопротивление i -й ветви, примыкающей к j -му узлу.

Вид ЧХ типа $Z_{ex} = f(v)$ зависит от узла расчетной схемы и ее параметров. Расчеты ЧХ и коэффициентов K_{I_i} и K_{g_v} для сложных разветвленных схем СЭ производятся средствами Mathcad 2000 Professional [9].

В качестве примера использования предложенной методики приведем анализ качества напряжения и выбор варианта КУ для одной из тяговых подстанций Красноярской железной дороги (подстанция «Камышта»).

При проведении инструментальных замеров показателей качества электроэнергии на этой подстанции были обнаружены существенные отклонения коэффициента несинусоидальности напряжения от значений, нормируемых ГОСТ 13109-97. Замеры, выполненные при отключенной КБ на шинах 27,5 кВ, показали существенное улучшение качества напряжения. Результаты замеров приведены в табл. 1 и 2.

Однолинейная схема подстанции изображена на рис. 3, а, а ее расчетная схема – на рис. 3, б.

В схему замещения для расчета ЧХ входного сопротивления $Z_{ex} = f(v)$ включены:

Z_v – сопротивление питающей системы;

$Z_{TBv}, Z_{TCv}, Z_{Ti v}$ – сопротивления обмоток высокого, среднего и низкого напряжения трансформатора;

Таблица 1. Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту искажения кривой напряжения на подстанции «Камышта» с включенной КБ

Измеряемая характеристика	Междуфазное АВ			Междуфазное ВС			Междуфазное СА			Нормативное значение
	Результат измерений	T1	T2	Результат измерений	T1	T2	Результат измерений	T1	T2	
$K_{U_{в}}, \%$	7,76	38,04		7,75	37,35		12,46	68,61		5,00
$K_{U_{нб}}, \%$	12,30		3,74	10,34		3,88	21,05		34,97	8,00

Таблица 2. Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту искажения кривой напряжения на подстанции «Камышта» с отключенной КБ

Измеряемая характеристика	Междуфазное АВ			Междуфазное ВС			Междуфазное СА			Нормативное значение
	Результат измерений	T1	T2	Результат измерений	T1	T2	Результат измерений	T1	T2	
$K_{UВ}, \%$	4,09	0,36		5,63	8,24		5,71	9,05		5,00
$K_{UНВ}, \%$	6,10		0,00	8,58		0,05	8,67		0,13	8,00

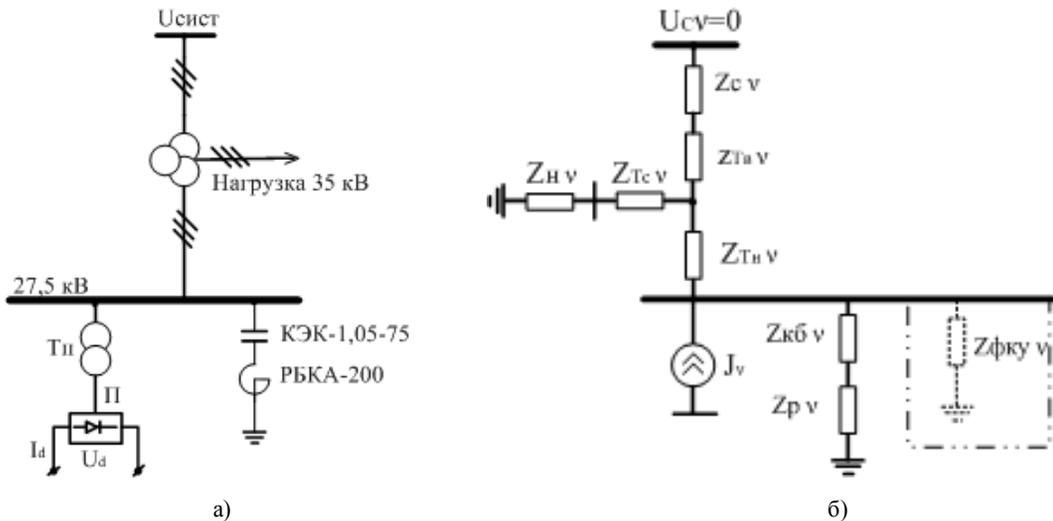


Рис. 3. Однолинейная схема и схема замещения подстанции «Камышта»

Zi_v – сопротивление обобщенной нагрузки на стороне 35 кВ;

$Z_{кБv}$ и Zp_v – сопротивления конденсаторной батареи типа КЭК-1,05-75-2У3 мощностью 3,85 МВА и реактора РБКА-200, установленных в настоящее время на подстанции;

$Z_{фкУv}$ – эквивалентное сопротивление рекомендуемого нами к установке ФКУ, в состав которого входят фильтры 5-, 7-, 9-, 11-й гармоник и широкополосный фильтр, настроенный на 13-15-ю гармоники. Суммарная мощность, генерируемая ФКУ, эквивалентна мощности, генерируемой конденсаторной батареей, установленной в настоящее время на подстанции;

J_v – суммарный спектр тока, генерируемый тяговой нагрузкой.

На рис. 4 представлены ЧХ входного сопротивления сети относительно шин 27,5 кВ для случая отсутствия КУ, случая подключения КБ и реактора (действующая схема) и случая подключения ФКУ (рекомендуемая схема).

При отсутствии ФКУ

$$Z_{вхv} = \frac{Z1v \cdot Z2v}{Z1v + Z2v} + Z3v \tag{3}$$

где $Z1v = Zcv + Ztv$, $Z2v = Ztcv + Zhv$, $Z3v = Zthv$.

При подключении КБ

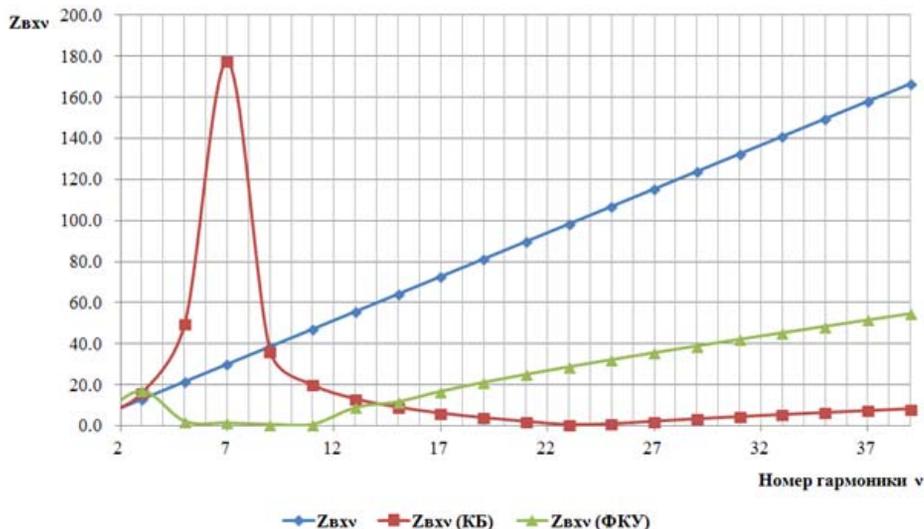


Рис. 4. Частотные характеристики входного сопротивления сети

$$Z_{вхν(КБ)} = Z_{4ν} \cdot \frac{(Z_{1ν} \cdot Z_{2ν} + Z_{3ν} \cdot Z_{1ν} + Z_{3ν} \cdot Z_{2ν})}{(Z_{1ν} \cdot Z_{2ν} + Z_{3ν} \cdot Z_{1ν} + Z_{3ν} \cdot Z_{2ν} + Z_{4ν} \cdot Z_{1ν} + Z_{4ν} \cdot Z_{2ν})}, \quad (4)$$

где $Z_{4ν} = Z_{КБν} + Z_{ρν}$,

и при подключении ФКУ

$$Z_{вхν(ФКУ)} = Z_{5ν} \cdot \frac{(Z_{1ν} \cdot Z_{2ν} + Z_{3ν} \cdot Z_{1ν} + Z_{3ν} \cdot Z_{2ν})}{(Z_{1ν} \cdot Z_{2ν} + Z_{3ν} \cdot Z_{1ν} + Z_{3ν} \cdot Z_{2ν} + Z_{5ν} \cdot Z_{1ν} + Z_{5ν} \cdot Z_{2ν})}, \quad (5)$$

где $Z_{5ν} = Z_{ФКУν}$.

Вид ЧХ с включением на подстанции КБ (действующая схема) свидетельствует о резонансном усилении 7-й гармоники токов и напряжений вследствие появления полюса ЧХ на резонансной частоте. При этом расчеты показали, что при включении КБ на шинах 27,5 кВ имеют место гармонические искажения токов и напряжений, характеризуемые коэффициентами $K_{Iν}$ и $K_{эν}$. Для рассмотренного случая справедливы соотношения:

$$K_{Iν(КБ)} = K_{эν(КБ)} = Z_{вхν(ФКУ)} / Z_{вхν}, \quad (6)$$

$$K_{Iν(КБ)} = K_{эν(КБ)} = Z_{вхν(ФКУ)} / Z_{вхν}. \quad (7)$$

В табл. 3 даны значения коэффициентов $K_{Iν}$ для внешней по отношению к преобразовательной нагрузке сети, а также значения $K_{Iν}^2$, которые определяют, во сколько раз увеличатся потери активной мощности на частоте ν при включении КУ. Величина $\sum K_{Iν}^2$ показывает суммарное увеличение потерь активной мощности от протекания токов высших гармоник.

Очевидно, что с включением КБ в качестве КУ имеет место усиление 5-й гармоники тока в 2,32 раза, 7-й гармоники тока – в 5,93 раза, а потери активной мощности на этих частотах превышают потери на основной частоте в 5,39 и 35,15 раза соответственно.

Таблица 3. Анализ несинусоидальности токов и напряжений сети с помощью ЧХ

ν	Z_{exv}	$Z_{\text{exv}}(\text{КБ})$	$Z_{\text{exv}}(\text{ФКУ})$	$K_{I\nu}(\text{КБ})$	$K_{I\nu}(\text{ФКУ})$	$K^2_{I\nu}(\text{КБ})$	$K^2_{I\nu}(\text{ФКУ})$	
1	4,3	4,4	4,4	1,02	1,02	1,05	1,05	
3	12,8	16,0	16,8	1,25	1,31	1,56	1,72	
5	21,4	49,6	2,1	2,32	0,10	5,39	0,01	
7	29,9	177,4	1,3	5,93	0,04	35,15	0,00	
9	38,5	36,3	0,6	0,94	0,02	0,89	0,00	
11	47,0	20,0	0,7	0,42	0,01	0,18	0,00	
13	55,6	13,0	8,8	0,23	0,16	0,06	0,02	
15	64,1	8,9	11,6	0,14	0,18	0,02	0,03	
17	72,7	6,1	16,7	0,08	0,23	0,01	0,05	
19	81,2	3,9	21,0	0,05	0,26	0,00	0,07	
21	89,8	2,0	24,9	0,02	0,28	0,00	0,08	
23	98,3	0,5	28,6	0,01	0,29	0,00	0,08	
25	106,8	0,9	32,1	0,01	0,30	0,00	0,09	
27	115,4	2,1	35,5	0,02	0,31	0,00	0,09	
29	123,9	3,3	38,8	0,03	0,31	0,00	0,10	
31	132,5	4,4	42,0	0,03	0,32	0,00	0,10	
33	141,0	5,4	45,2	0,04	0,32	0,00	0,10	
35	149,6	6,4	48,3	0,04	0,32	0,00	0,10	
37	158,1	7,3	51,4	0,05	0,33	0,00	0,11	
39	166,7	8,2	54,5	0,05	0,33	0,00	0,11	
						$\sum K^2_{I\nu}$	44,31	3,92

Суммарные потери от протекания токов всех гармоник в сети возрастают в 44,31 раза и практически равны величине активных потерь на основной частоте.

Рекомендуемое к установке ФКУ, как видно на рис. 4, позволяет практически полностью исключить протекание в сети токов 5-, 7-, 9-, 11-й гармоник и существенно снизить величины гармоник более высокого порядка. Несмотря на некоторое увеличение гармоник высокого порядка по сравнению с вариантом установки КБ в качестве КУ, суммарные потери активной мощности от протекания токов высших гармоник возрастают только в 3,92 раза и не превышают значений, нормируемых ГОСТ 13109-97, что свидетельствует о существенно более высокой эффективности применения ФКУ в качестве КУ при той же генерируемой реактивной мощности.

Список литературы

[1] Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.

[2] Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. ГОСТ 13109-97 г. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения// Из-

дание официальное. Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск.: Протокол № 12 – 97 от 21 ноября 1997 г.

[3] *Иванов В.С.* Метод расчета несинусоидальности напряжения и исследование резонансных явлений на высших гармониках в сети внутрезаводского электроснабжения при работе вентельных преобразователей. М.: МЭИ 1978. 206 с.

[4] *Минина А.А., Платонова Е.В.* Исследование несинусоидальности напряжения на тяговых подстанциях переменного тока: сб. материалов. Томск.: Изд-во ТПУ, 2010. 345 с.

[5] *Минина А.А., Пантелеев В.И.* Обеспечение электромагнитной совместимости при компенсации реактивной мощности на тяговых подстанциях переменного тока: сб. материалов. Тольятти.: ТГУ 2011. 215 с.

[6] *Мамошин Р.Р.* Электроснабжение электрофицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1980. 295 с.

[7] *Марквардт К.Г.* Электроснабжение электрофицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 524 с.

[8] *Федоров А.А.* Основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат 1984. 472 с.

[9] *Дьяконов В.П., Абраменкова И.В.* MathCAD 2000 в математике, физике и в Internet, Ноллидж, 2001. 592 с.

Ensuring Quality of the Electric Power in Systems of Traction Power Supply of the Alternating Current

**Aleksandra A. Minina^a,
Vasily I. Panteleev^a and Elena V. Platonova^b**

^a *Siberian Federal University,
Polytechnic Institute*

70 Lenin Str., Krasnoyarsk, 660049 Russia

^b *Siberian Federal University,*

*Khakass Technical Institute - a branch,
27 Shchetinkina, Abakan, 655017 Russia*

The mathematical modeling of means of compensation of jet capacity in system of traction power supply is executed. The alternative practical design procedure of a traction network allowing on the basis of the analysis of the frequency characteristic of entrance resistance $Z_{en} = f(\nu)$ to define ranges of currents and tension in elements of a network is offered, and also to estimate levels of active losses and an overload of compensating devices currents of the highest harmonicas.

Keywords: compensation of jet capacity, resonant contour, frequency characteristic, ranges of currents, ranges of the tension, the highest harmonicas, compensation devices.
